

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CAMARA ANECOICA PARA MEDIDAS
DE AUDIO

AUTOR: Jaime Solórzano García

TUTOR: Luis Hernández Corporales

SEPTIEMBRE 2013

Al progreso, lo único que consigue levantarme cada día

Índice

Contenido

1.	Resumen.....	6
2.	Motivación y objetivos	7
2.1	Motivación	7
2.2	Objetivos	8
3.	Descripción del sistema.....	9
3.1	Tarjeta de sonido.....	9
3.2	Micrófono de calibración	10
3.3	Sonómetro.....	10
3.4	Altavoz	11
4.	Diseño preliminar del sistema.....	12
4.1	Cumpliendo especificaciones	12
4.1.1	125dB SPL y pequeño tamaño	12
4.1.2	Sistema calibrado que presente una medida fiable	16
5.	Diseño y construcción del sistema	18
5.1	El altavoz dinámico.....	18
5.2	Parámetros Thiele-Small	21
5.3	Escogiendo el altavoz dinámico	22
5.4	Desarrollo del modelo eléctrico equivalente de un altavoz	23
5.5	Extrayendo los parámetros Thiele-Small	24
5.6	Circuito acústico equivalente de un altavoz	36
5.7	Análisis acústico de la cámara anecoica.....	38
5.8	Construcción de una cámara de prueba	41
5.9	Mediciones sobre la cámara anecoica de prueba y cámara definitiva	43
5.10	Implementación del filtro analógico	50
5.11	Fuente de alimentación y amplificador de potencia.....	52
6.	Programa de medición en Matlab.....	57
7.	Presupuesto y tiempo de amortización	67
8.	Conclusiones.....	68
9.	Bibliografía	69
10.	Anexos	70

1. Resumen

Este trabajo de fin de grado acomete el desarrollo de un proyecto de medición acústica de la respuesta de micrófonos MEMS. El sistema consta de un programa de ordenador capaz de generar y adquirir datos con el fin de realizar las mediciones oportunas. Esas señales se convierten en señales analógicas mediante una tarjeta de sonido externa. Se realiza una ecualización previa con un filtro analógico y una amplificación con un amplificador de potencia que ataca un altavoz. Este altavoz genera un sonido dentro de una cámara anecoica que es registrado por el micrófono a medir. La señal vuelve a la tarjeta de sonido y es recogida por el ordenador. El programa aplica una corrección a todo el sistema de modo que su respuesta en frecuencia es plana.

2. Motivación y objetivos

En este primer capítulo se pondrán de manifiesto las necesidades por las cuales se ha llevado a cabo este proyecto y así mismo los objetivos a conseguir.

2.1 Motivación

La Universidad Carlos III de Madrid está llevando a cabo un proyecto pionero: desarrollo de nuevos sistemas conversión analógico-digital para su aplicación en la adquisición de señales sonoras utilizando los novedosos transductores electro-acústicos con tecnología MEMS (Microelectromechanical systems).

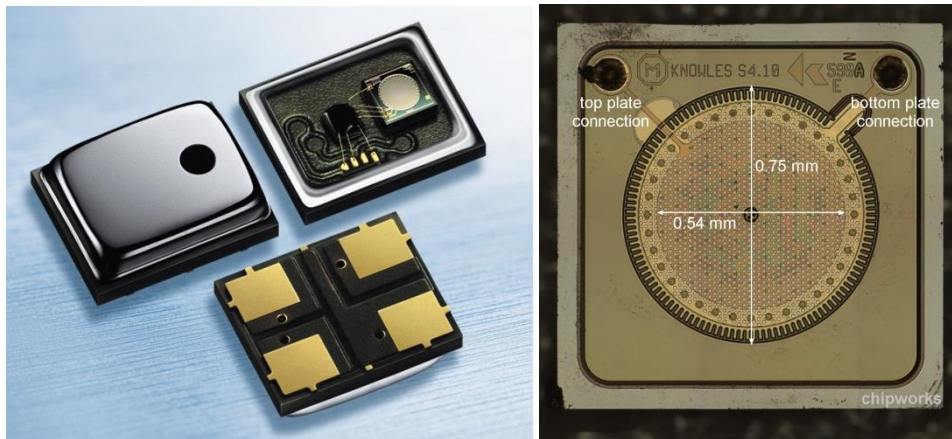


Figura 1. Cápsula microfónica MEMS (Cortesía de Infineon Technologies)

Esta nueva tecnología MEMS ofrece una enorme reducción del tamaño de los transductores pero sus sistemas de conversión analógico-digitales aún no han tenido una drástica transformación en las últimas décadas. Es por ello que se está desarrollando un sistema de conversión sigma-delta que utiliza el micrófono como base de un VCO, que abarataría los costes de producción, consumo de energía, tamaño de los circuitos asociados sin reducir las prestaciones de los mismos.

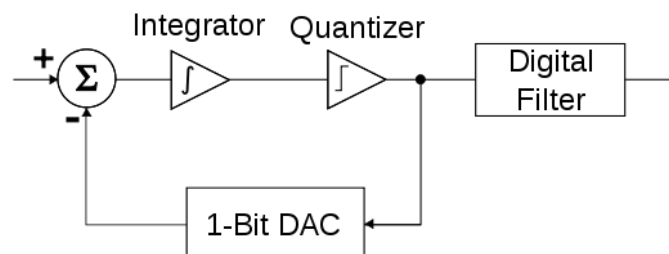


Figura 2. Modulación sigma-delta

2.2 Objetivos

Desarrollar un sistema completo de medición acústica incluyendo una cámara anecoica para micrófonos, entendiendo por cámara anecoica, un espacio libre de reverberación, eco y ruidos externos que permita realizar una medida de la respuesta en frecuencia de diversos micrófonos a diferentes niveles sonoros para poder probar de manera rápida y eficaz los sistemas de conversión sigma-delta en desarrollo. El sistema debe cumplir con las siguientes características:

- 125dB de presión sonora máxima alcanzable como mínimo
- Sistema calibrado que presente una medida fiable
- Pequeño tamaño

3. Descripción del sistema

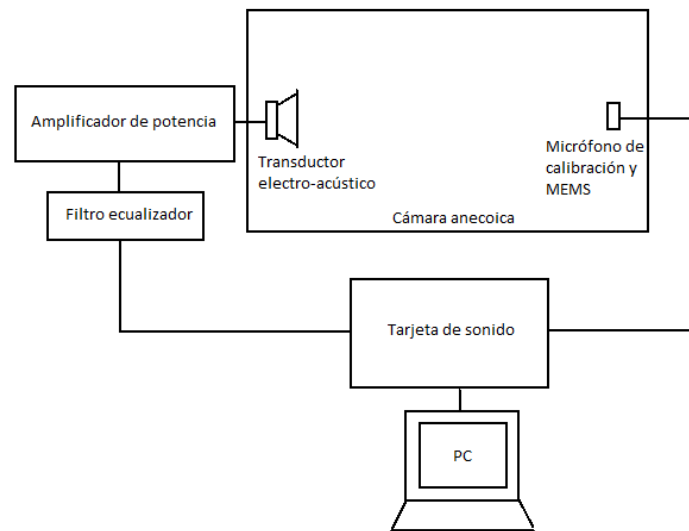


Figura 3. Sistema completo

Un ordenador con un software desarrollado en este proyecto, se encarga de generar y adquirir unas señales utilizadas para medir acústicamente la respuesta de un sistema y de mostrar en pantalla los resultados. La tarjeta de sonido es el elemento de unión entre las partes analógica y digital del sistema. A partir de aquí se trata con dos señales: la señal emitida que pasa por el filtro ecualizador, el amplificador de potencia y finalmente llega al transductor electro-acústico y la señal que se recibe del micrófono.

3.1 Tarjeta de sonido

Por su complejidad, el alto coste de desarrollo, abundancia y precio, este elemento se ha decidido comprarlo. El modelo elegido es Focusrite Scarlett 2i2



Figura 4. Focusrite Scarlett 2i2

Para más información técnica revisar el anexo

3.2 Micrófono de calibración

Este micrófono se utiliza para calibrar todo el sistema y obtener una respuesta plana. El modelo elegido es: ECM8000 de Behringer por su excepcional respuesta en frecuencia.



Figura 5. Micrófono ECM8000

Para más información consultar el anexo

3.3 Sonómetro

Este sonómetro se utiliza para calibrar el nivel de presión sonora medida por el micrófono de calibración, ya que este únicamente tiene una calibración precisa en frecuencia y no en ganancia. Su rango en frecuencia es más limitado. El modelo elegido es: AZ8922



Figura 6. Sonómetro AZ8922

Para más información consultar el anexo

3.4 Altavoz

El altavoz elegido, como se explicará en el capítulo 5.3 tiene unas características muy determinadas para la aplicación. El modelo es: W2-800SH de la prestigiosa marca taiwanesa TangBand.



Figura 7. TB W2-800SH

En el anexo se puede obtener más información de sus características.

4. Diseño preliminar del sistema

Una vez abordadas las partes integrantes del sistema ya adquiridas de manera comercial queda por definir todo el resto.

4.1 Cumpliendo especificaciones

En este apartado se abordan los elementos de manera global, debido a que las especificaciones no se alcanzan únicamente con cada elemento. Todos influyen en mayor o menor medida en cada una de las especificaciones.

4.1.1 125dB SPL y pequeño tamaño

El sonido como tal es un fenómeno que involucra la propagación de una onda longitudinal de presión a través de un medio elástico. Esta onda de presión se puede medir como cualquier otro tipo de presión en Pascales. Se define el umbral de audición como el nivel a partir del cual percibimos un sonido y se establece en:

$$P_0 = 20 \cdot 10^{-6} Pa.$$

Un nivel sonoro muy desagradable y perjudicial que podríamos definir como el máximo que una persona normal puede soportar es de 130dB. Si transformamos este nivel sonoro en magnitudes absolutas mediante la definición de decibelios:

$$130dB \text{ SPL} = 20 \log \left(\frac{P_{130dB}}{P_0} \right) \Rightarrow P_{130dB} = P_0 \cdot 10^{\frac{130}{20}} = 63.25 Pa$$

La diferencia de presión entre los niveles máximo y mínimo soportables por el oído humano es de varios órdenes de magnitud y es por esa razón por la que se utiliza la nomenclatura logarítmica de los decibelios.

Nivel de intensidad del sonido.	
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de Gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Ruido del campo
0 dB	Umbral de la audición

Tabla 1. Relación entre decibelios y sonidos cotidianos

Observando los requisitos del sistema, llama la atención el primero de ellos: 125dB de presión sonora máxima. Es un nivel de presión sonora muy elevado, en la tabla 1 se puede observar que es un nivel superior al generado por un motor de avión en marcha a 20 metros. Teniendo en cuenta la gran potencia involucrada en un motor de avión en marcha, la potencia radiada en forma de sonido:

$$P = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad [1]$$

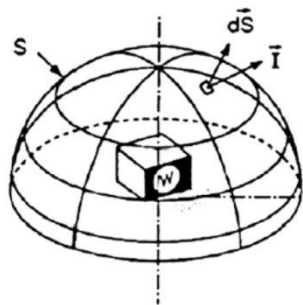


Figura 8. Definición del área de trabajo 2π para la ecuación [1]

Siendo \vec{I} el vector intensidad sonora definido por:

$$\vec{I} = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot V_s} \hat{V}_s \quad [2]$$

- ρ_0 : densidad del aire
- V_s : velocidad del sonido
- p : presión sonora
- \hat{V}_s : vector unitario de velocidad del sonido

Sustituyendo [2] en [1], teniendo en cuenta el volumen de una semiesfera y suponiendo una radiación omnidireccional:

$$P = \int_S \frac{p^2}{\rho_0 \cdot V_s} \hat{V}_s \cdot \overrightarrow{dS} = \frac{p^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2}{\rho_0 \cdot V_s} \quad [3]$$

Se pueden sacar conclusiones de la ecuación [3]: La potencia radiada tiene una relación cúbica con la presión, lineal con la superficie y cuadrática con la distancia. Para el caso del motor de avión:

$$P = \frac{(63Pa)^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (20m)^2}{\frac{1.2kg}{m^3} \cdot 340m/s} \sim 50KW$$

Evidentemente, no es necesario que el sistema radie potencias elevadas, por lo tanto, para alcanzar presiones sonoras suficientes, la distancia del micrófono al punto de radiación debe ser mínima.

El transductor electro-acústico por excelencia es el altavoz dinámico o de bobina móvil. En el capítulo 5.1 se aborda con detenimiento su funcionamiento.

Un parámetro de medida cuantitativa de la presión sonora que genera un altavoz es su sensibilidad. Esta se define como la presión sonora generada a 1 metro de distancia cuando se aplica 1 W de potencia al transductor. La sensibilidad típica ronda los $90 \frac{dB}{W \cdot m}$. La modificación de la presión a una distancia d_2 viene definida por:

$$P_{d_2} = Sensibilidad_d + 20 \log \left(\frac{d}{d_2} \right) \quad [4]$$

Por otro lado, la presión sonora a una potencia de entrada P_2 se define como:

$$P_{P_2} = Sensibilidad_p + 10 \log \left(\frac{P_2}{P} \right) \quad [5]$$

Uniendo las ecuaciones [4] y [5]:

$$P_{d_2, P_2} = Sensibilidad_{d,p} + 10 \log \left(\frac{P_2}{P} \right) + 20 \log \left(\frac{d}{d_2} \right) \quad [6]$$

Evalutando en [6] para unos valores típicos de altavoz dinámico con una distancia de 5cm y 10W de entrada:

$$P_{5cm, 10W} = Sensibilidad_{1m, 1W} + 10 \log(10) + 20 \log \left(\frac{1}{0.05} \right) = 126dB$$

Con lo cual se alcanza el nivel sonoro con unos valores razonables de potencia y distancia.

El rendimiento de un altavoz dinámico es muy pobre, de entorno al 1%. Debido a que su impedancia de salida es muy elevada en comparación con la impedancia de radiación en el aire (Esto se explica con detalle en el capítulo 5.6).

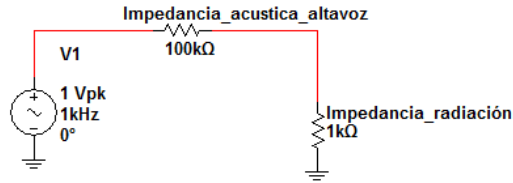


Figura 9. Equivalencia eléctrica simplificada distribución de la potencia

Existe una forma de aumentar ese rendimiento: adaptando impedancias. Esto se consigue mediante un transformador acústico llamado horn o bocina.

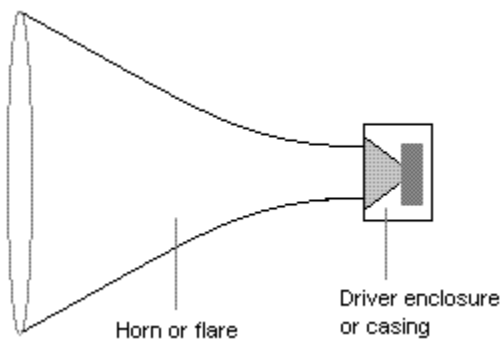


Figura 10. Transformador acústico de tipo bocina exponencial

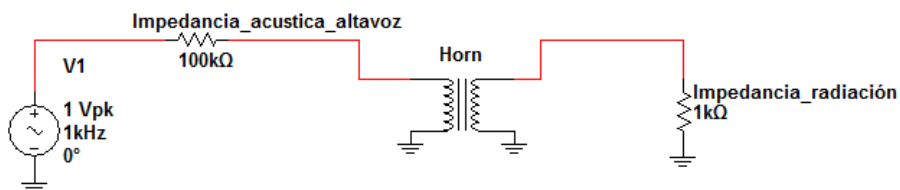


Figura 11. Equivalente eléctrico simplificado de una adaptación de impedancias mediante horn

La impedancia de radiación se ve multiplicada por el cuadrado de la relación de la relación de transformación lo que aumenta el valor de la misma vista desde el primario y a su vez, la eficiencia y la potencia disipada en ella.

Hay que recordar que para alcanzar la presión sonora de consigna, no es necesario aumentar el rendimiento de emisión y por simplicidad, coste y tamaño se desecha la opción de aumentar el rendimiento mediante un horn.

La última posibilidad sería aumentar de alguna manera la impedancia del derecho del esquema. Esta impedancia como se analizará detenidamente en el capítulo 5.6 posee una parte resistiva y otra reactiva. La parte resistiva depende en gran medida del diámetro del altavoz. En la parte reactiva entran en juego muchos factores, como por ejemplo, el volumen de la futura cámara anecoica, que se puede representar como una capacidad.

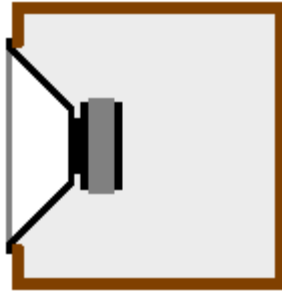


Figura 12. Altavoz y volumen equivalente de la cámara anecoica

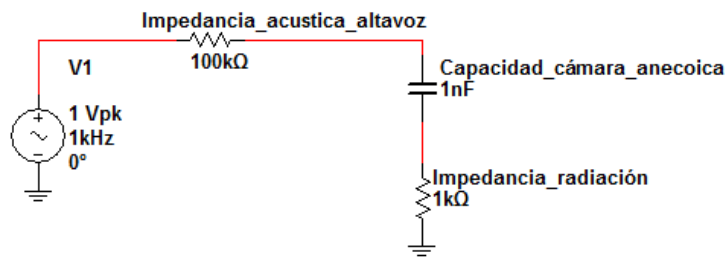


Figura 13. Equivalente eléctrico simplificado del sistema altavoz-cámara anecoica

La tensión, en este símil eléctrico define la presión sonora. El conjunto de la capacidad de la cámara anecoica y la impedancia de radiación ahora si representa un valor equivalente a la impedancia acústica del altavoz. La emisión de potencia sonora ha disminuido pero la presión ha aumentado consistentemente. Como se explicará con más detalle en el capítulo 5.6 la capacidad representada por un volumen de aire es menor, cuanto menor sea ese volumen de aire y por tanto su impedancia será mayor.

4.1.2 Sistema calibrado que presente una medida fiable

Se entiende por cámara anecoica un lugar libre de ruido, ecos y reverberaciones, tanto internos, como externos. Las clásicas cámaras anecoicas siempre han sido grandes, con materiales absorbentes acústicos sobre sus paredes, techo e incluso suelo.



Figura 13. Cámara anecoica tradicional

La principal necesidad de recubrir toda la cámara internamente con absorbente es la de amortiguar resonancias y eliminar reverberaciones y ecos.

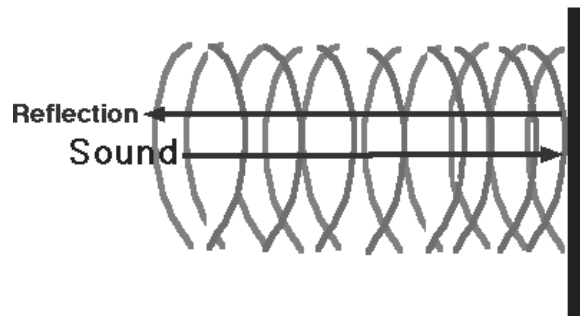


Figura 14. Concepto de reflexión sonora

Todos estos efectos bien conocidos e intuitivos dejan de tener rigor cuando la longitud de onda se hace grande en comparación con las longitudes en las que se refleja el sonido. Para una cámara anecoica pequeña, todos estos efectos ocurrirán a alta frecuencia dejando por debajo un espectro completamente libre de resonancias acústicas. Todo esto se analizará con más detenimiento en el capítulo 5.7.

El sistema debe tener una respuesta plana en frecuencia y conocida en nivel sonoro. Las no linealidades en frecuencia son corregidas mediante el filtro ecualizador y el software del PC. El nivel de SPL es calibrado mediante el sonómetro.

5. Diseño y construcción del sistema

En este capítulo se abordará el diseño exhaustivo, la construcción y el montaje de todas las partes que integran el sistema.

5.1 El altavoz dinámico

El altavoz dinámico o de bobina móvil es el tipo de transductor electro-acústico más utilizado. Está compuesto por una bobina inmersa en el campo magnético constante generado por un imán permanente, un diafragma y una suspensión que controla el movimiento.

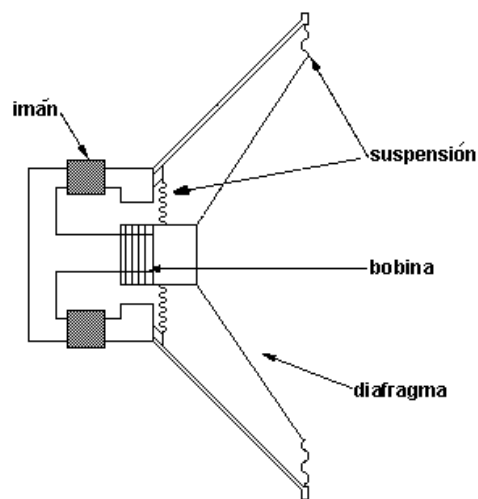


Figura 15. El altavoz dinámico

Su funcionamiento es simple: la señal eléctrica aplicada a la bobina genera un campo magnético que se opone al campo magnético del imán permanente y aparece una fuerza. Esta fuerza desplaza el diafragma hasta que se produce un equilibrio de fuerzas entre la generada por la bobina y por la suspensión.

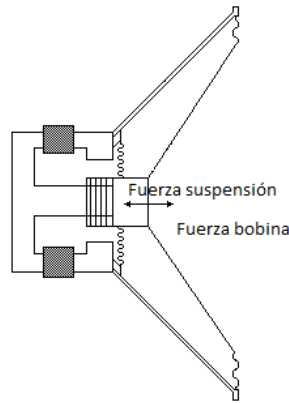


Figura 16. Equilibrio de fuerzas

La suspensión ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento del diafragma: esto es un muelle.

$$F = k \cdot x$$

La suspensión está compuesta de un material elástico, pero no carece de una resistencia mecánica parásita. Por otro lado, el conjunto diafragma-bobina-suspensión tiene una masa determinada.

El aire que se encuentra por delante y por detrás del diafragma actúa como masa a baja frecuencia, como muelle en alta frecuencia y además presenta una resistencia de radiación acústica, todo este conjunto se denomina impedancia mecánica de radiación. Todos los elementos se mueven a la misma velocidad. El circuito mecánico equivalente es el siguiente:

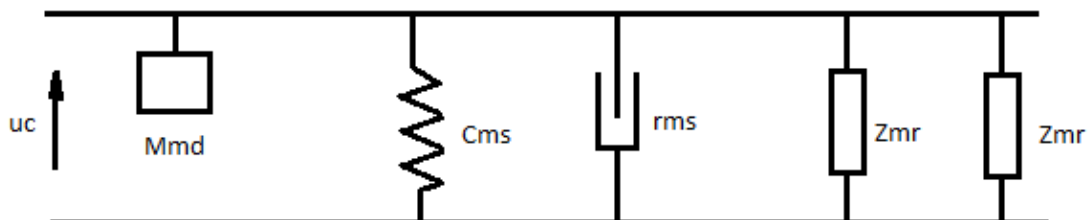


Figura 17. Circuito mecánico equivalente diafragma-bobina-suspensión

M_{MD} : Masa mecánica

C_{MS} : Compliancia mecánica de la suspensión

r_{MS} : Inversa de la resistencia mecánica de la suspensión

Z_{MR} : Impedancia mecánica de la carga de aire por cada lado del diafragma

u_c : Velocidad

El elemento transductor electro-mecánico es el conjunto imán-bobina, cuyo parámetro característico es $Bl = \text{Campo magnético} \times \text{Longitud de la espira}$, medido en $[T \cdot m]$ ó $\left[\frac{N}{A}\right]$.

Se puede modelar este elemento como un transformador: por el primario recibe una tensión eléctrica y la transforma en una fuerza mecánica.

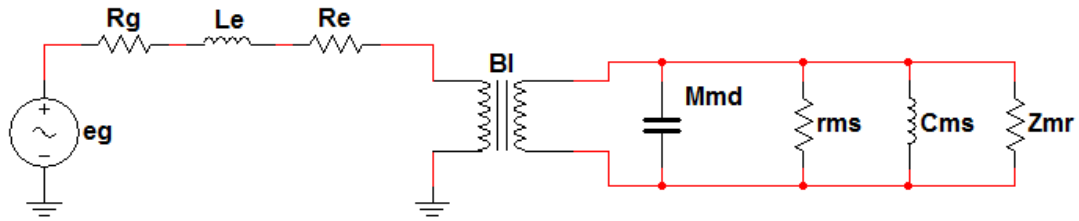


Figura 18. Analogía electromecánica de un altavoz

Han aparecido elementos nuevos:

L_e : Inductancia de la bobina de voz

R_e : Resistencia de la bobina de voz

e_g : Generador de tensión. Normalmente este elemento es el amplificador de potencia

R_g : Resistencia de salida del amplificador

La masa del diafragma se ve reflejada como una capacidad y la compliancia como una inductancia. Esto puede parecer contra intuitivo, pero no lo es, la velocidad es constante para todos los elementos; la fuerza en cambio, se distribuye por cada uno. En alta frecuencia la masa del diafragma absorbe mucha más fuerza que a baja frecuencia, su impedancia baja con la frecuencia, al igual que un condensador. En el circuito electro-acústico que se analizará más adelante se realizará una transformación de fuerza en velocidad y las reactancias de la parte mecánica se invierten de signo.

Se acaba de definir un circuito resonante. Esta resonancia es muy útil en baja frecuencia.

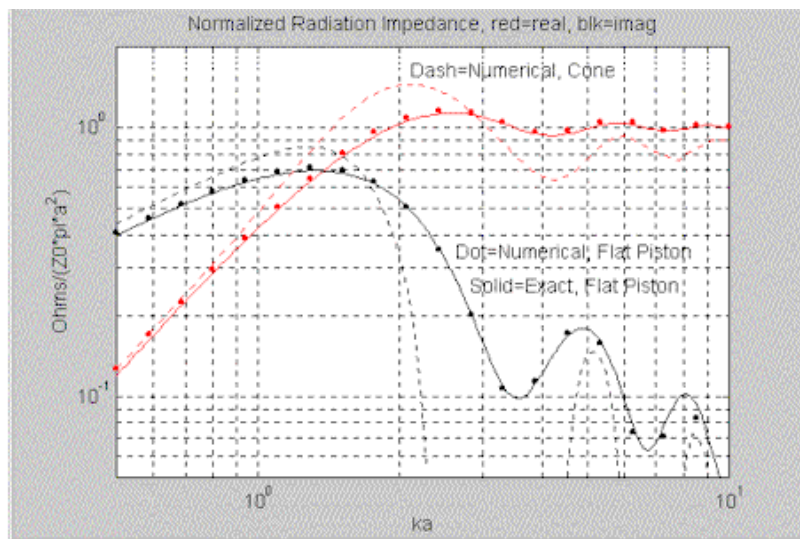


Figura 19. Reactancia (línea negra) y resistencia (línea roja) normalizadas de un pistón ideal de radio= a

$$k = \omega/c$$

Como se puede observar, en baja frecuencia, el valor resistivo de la impedancia de radiación disminuye abruptamente, lo que equivale a que se necesita mover más aire (velocidad volumétrica) para obtener la misma presión acústica.

Un altavoz, por regla general, utiliza su resonancia para aumentar la velocidad volumétrica a baja frecuencias. En frecuencias medias no es necesario porque la resistencia acústica es constante y la velocidad volumétrica debe seguir la siguiente regla para conseguir una respuesta en frecuencia constante:

$$v_v = c \cdot \frac{1}{\omega}$$

Siendo c una constante.

La frecuencia de resonancia es definida en gran medida los elementos mecánicos del sistema. Si bien los elementos eléctricos (L_e) tienen influencia, pueden despreciarse porque suponen un error mínimo.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MD} \cdot C_{MS}}}$$

La resistencia R_g , de existir, cumple un papel fundamental en la emisión en frecuencias medias. Los amplificadores de potencia realimentados en tensión modernos, unidos a cables de sección suficiente hacen que este parámetro puede despreciarse igualmente.

La inductancia L_e junto con la resistencia R_e , generan un polo en alta frecuencia denominado frecuencia de corte electromagnética:

$$f_{cem} = \frac{1}{2\pi \cdot L_e \cdot R_e}$$

Se puede definir a continuación el ancho de banda típico de un altavoz:

$$BW = f_{cem} - f_r$$

Las velocidad volumétricas fuera del ancho de banda decaen mucho más rápido de lo que deberían hacer para obtener una respuesta plana, por tanto si ningún otro elemento o efecto físico interviene, el altavoz sólo es útil en el ancho de banda especificado. En este proyecto se va a utilizar una altavoz fuera de su ancho de banda, pero porque van a entrar en juego otros elementos y filtro que lo harán posible.

5.2 Parámetros Thiele-Small

Thiele y Small fueron unos destacados físicos que estudiaron los altavoces dinámicos en la primera mitad del siglo XX. Definieron y modelaron el comportamiento de los altavoces mediante unas simples ecuaciones y unos parámetros que llevan su nombre. Estos parámetros se siguen utilizando hoy en día.

Parámetros mecánicos:

- S_d – Area efectiva del diafragma. En metros cuadrados.
- M_{md} – Masa del conjunto, incluida la carga del aire circundante, en kilogramos.
- C_{ms} – Compliancia de la suspensión del altavoz, en metros por newton
- R_{ms} – Resistencia de la suspensión del altavoz, en N·s/m
- L_e – Inductancia de la bobina de voz, en Henrios
- R_e – Resistencia de la bobina de voz en ohms.
- Bl – Producto de la intensidad de campo magnético por la longitud efectiva del cable que forma la bobina de voz inmersa en el campo magnético, en tesla-metros (T·m).

Sus análogos acústicos siguen la notación: C_{as} , M_{ad}

Parámetros en pequeña señal:

- F_s – Frecuencia de resonancia, Hz
- Q_{es} – Factor de calidad Q eléctrico del altavoz a la frecuencia de resonancia
- Q_{ms} – Factor de calidad Q mecánico del altavoz a la frecuencia de resonancia
- Q_{ts} – Factor de calidad Q total del altavoz a la frecuencia de resonancia

5.3 Escogiendo el altavoz dinámico

Para lo que concierne al proyecto, cuanto menos resonante sea el sistema mejor puesto que se quiere conseguir una respuesta plana sin oscilaciones, Q_{ts} debe tender a cero.

Bl actúa directamente sobre la eficiencia y la fuerza que se genera en la bobina de voz. Debe ser máximo.

Por debajo de cierta longitud de onda, el diafragma se vuelve elástico y comienza a vibrar, generando nuevas resonancias muy difíciles de determinar. Esta resonancia del diafragma se define como cone-breakup y depende de su rigidez y de su tamaño. S_d se debe minimizar y maximizar la rigidez del cono.

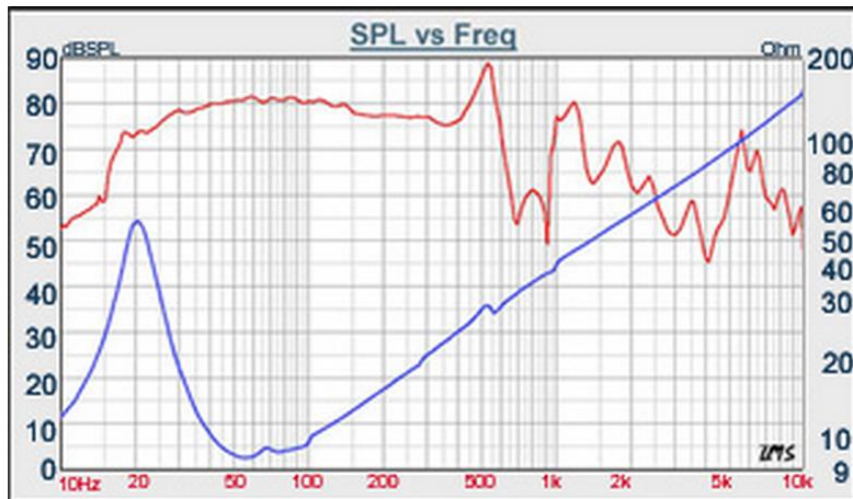


Figura 20. Respuesta en frecuencia e impedancia eléctrica (se definirá más adelante en este capítulo) de un altavoz de 12" de diámetro. Puede observarse el cone-breakup a 500Hz que supondría el primer modo de resonancia del diafragma, seguido de los siguientes a medida que la frecuencia aumenta. Por encima de esta frecuencia la respuesta es tan errática que no se puede utilizar como transductor electroacústico de alta fidelidad aunque la frecuencia de corte electromagnética quede por encima.

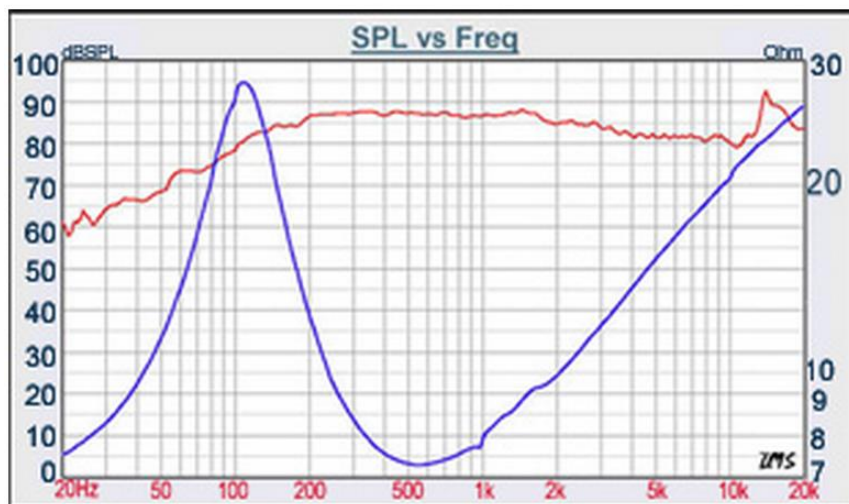


Figura 21. Respuesta en frecuencia de un altavoz de 3" de diámetro.

El altavoz elegido presenta un comportamiento que cumple con todas las características anteriores además de ofrecerlos a un precio razonable:

TangBand W2-800SL

Para más información consultar el anexo con su correspondiente hoja de características.

5.4 Desarrollo del modelo eléctrico equivalente de un altavoz

Entre los dos terminales de la bobina de voz de un altavoz, aparece reflejado todo el circuito resonante antes descrito. Normalmente la herramienta más interesante en la categorización

de los parámetros TS es la medida de la impedancia a través de la bobina. En este apartado, se va a calcular el modelo eléctrico equivalente entre los terminales de la bobina. Partiendo del esquema de la figura 18 se puede eliminar el transformador multiplicando las impedancias por Bl^2 . La impedancia de radiación, como ya se ha explicado en el capítulo 5.1, tiene un valor resistivo pequeño y reactivo grande a la frecuencia de resonancia del altavoz. Por tanto se puede simplificar por una inductancia.

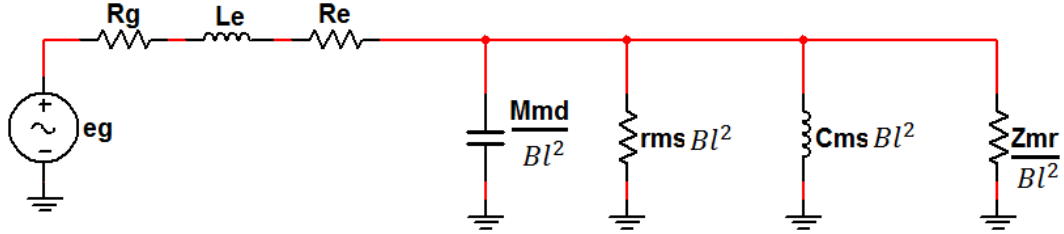


Figura 22. Esquema eléctrico completo de un altavoz

Simplificando elementos en serie y en paralelo:

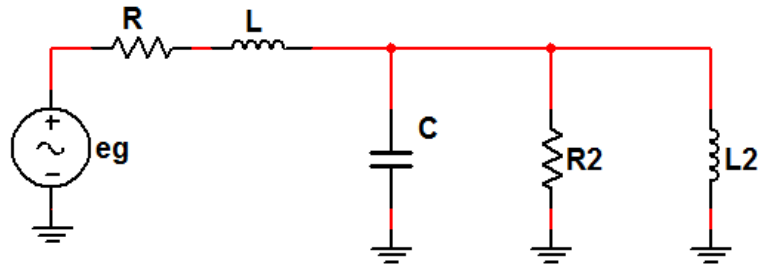


Figura 23. Esquema eléctrico completo y compacto de un altavoz

$$R: R_g + R_e$$

$$L: L_e$$

$$L_2: C_{MS} Bl^2$$

$$C: \frac{M_{MD}}{Bl^2} + \frac{Z_{MR}}{Bl^2}$$

$$R_2: \frac{Bl^2}{R_{MS}}$$

En este modelo paralelo todas las impedancias se encuentran en su modelo inverso, incluida rms :

$$rms = \frac{1}{R_{MS}}$$

4.5 Extrayendo los parámetros Thiele-Small

La dispersión estadística en la fabricación de altavoces suele ser bastante grande. No todas las partidas salen iguales y la compliancia de las suspensiones, por ejemplo, pueden cambiar de valor con el tiempo. También existen fabricantes poco fiables que muestran en sus hojas de características unos parámetros TS de superior rendimiento a los que realmente tienen sus altavoces. Por todos estos motivos se va a presentar un método alternativo para medir estos parámetros que involucra bastante equipo de medición y obtiene valores muy fiables.

El valor de R_e puede ser medido con un polímetro.



Figura 24. Medición de resistencia en continua

$$R_e = 3.7 \, \Omega$$

L_e también puede ser medida directamente con un inductómetro:



Figura 25. Medición de la inductancia de la bobina

$$L_e = 27,36 \, \mu H$$

Para medir Bl se sitúa el altavoz entre dos masas con una balanza de precisión previamente calibrada con un peso patrón y se inyecta una corriente conocida a través de la bobina.



Figura 26. Báscula de precisión (0,01 gramos) y peso patrón de 100,001 gramos

mA	gramos fuerza
0	-1,6
50	17,6
100	34,7
150	55
200	73,1
250	92,5

Tabla 2. Fuerza generada por el motor del altavoz en función de la corriente

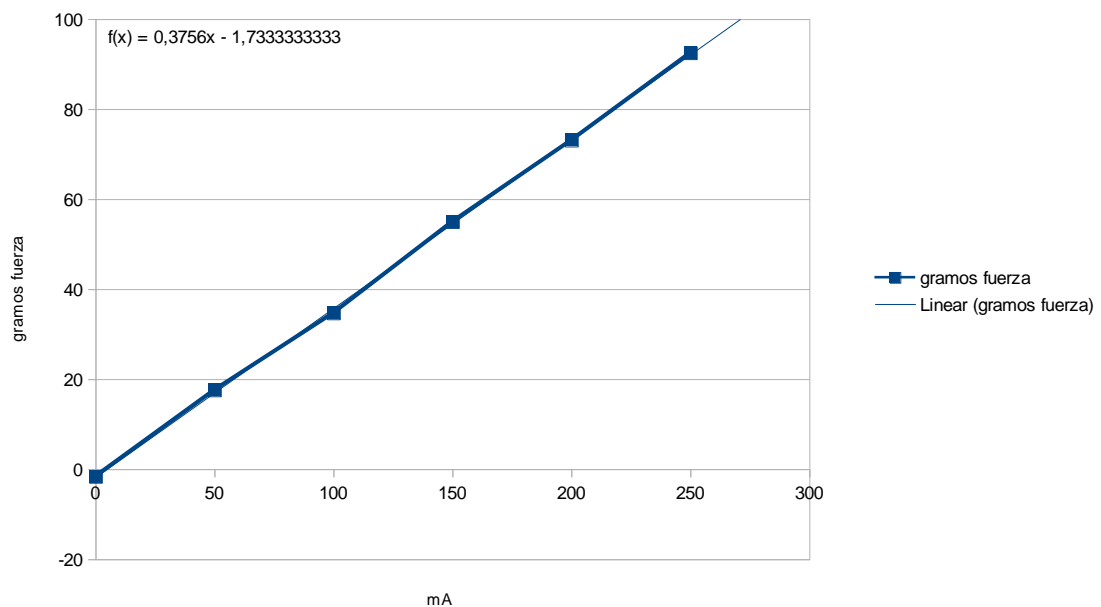


Figura . Gráfico fuerza/intensidad

La pendiente de la recta define Bl

$$Bl = 3.756 \frac{N}{A}$$

El resto de medidas requieren un cálculo previo. Se va a analizar la impedancia del circuito de la figura 23 visto desde el generador. En primer lugar se calcula la impedancia en paralelo de L_2 , R_2 y C :

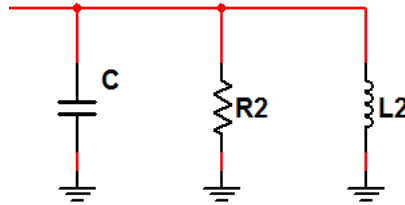


Figura 27. Impedancia paralelo

$$Z_{\text{paralelo}} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{\frac{1}{s \cdot L_2}} + \frac{1}{s \cdot C}} = \frac{s \cdot L_2}{\frac{s \cdot L_2}{R_2} + s^2 \cdot L_2 \cdot C + 1}$$

La impedancia total será la suma de todas las impedancias en serie:

$$Z_{\text{total}} = R + s \cdot L + \frac{s \cdot L_2}{\frac{s \cdot L_2}{R_2} + s^2 \cdot L_2 \cdot C + 1} = R + s \cdot L + \frac{s \cdot L_2}{\frac{s \cdot L_2}{R_2} - \omega^2 \cdot L_2 \cdot C + 1}$$

Se define un punto de resonancia en el cual las reactancias mecánicas se anulan:

$$-\omega^2 \cdot L_2 \cdot C + 1 = 0 \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C}}$$

A la frecuencia de resonancia la impedancia queda como:

$$Z_{\text{resonancia}} = R + s \cdot L + R_2$$

El producto $s \cdot L$ tiene un valor despreciable en resonancia respecto a $R + R_2$, entonces:

$$Z_{\text{resonancia}} = R + R_2$$

Se analiza en MATLAB la función de transferencia de la impedancia con valores aleatorios para observar a grandes rasgos su forma.

Name ▲	Value
C	5
L1	2
L2	4
R1	1
R2	3

Tabla 3. Valores con valores aleatorios

```
>> num=[(L1*L2*C) (L2*C*R1+L1*L2/R2) (R1*L2/R2+L1+L2) R1]

num =

    40.0000    22.6667    7.3333    1.0000

>> den=[(L2*C) (L2/R2) 1]

den =

    20.0000    1.3333    1.0000

>> impedancia=tf(num,den)

Transfer function:
40 s^3 + 22.67 s^2 + 7.333 s + 1
-----
20 s^2 + 1.333 s + 1

>> bode(impedancia,{0.01,1},P)
```

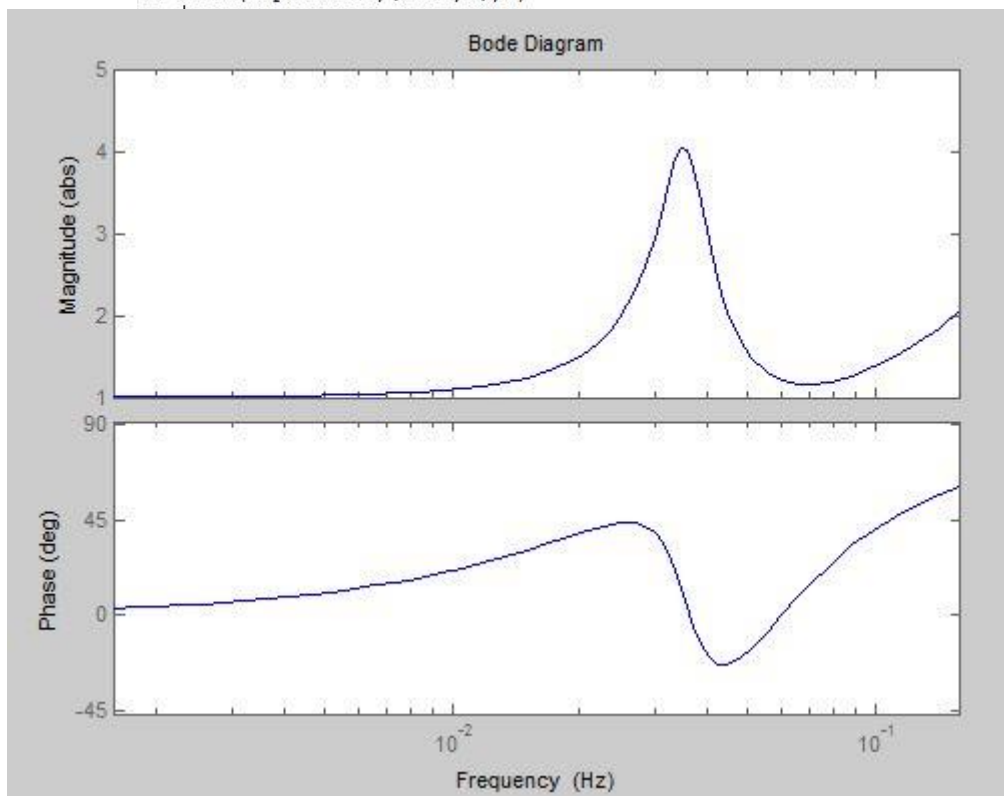


Figura 28. Función de transferencia de prueba

Se observa que se cumplen los cálculos realizados

$$Z_{resonancia} = R + R_2 = 4\Omega$$

Ahora se mide la impedancia del altavoz, para realizar esta tarea se puede utilizar un amplificador de audio, un generador de funciones, un osciloscopio y una resistencia de valor conocido. Esta opción es buena, pero existe otra aún mejor: Room EQ Wizard. Es un programa de software libre para la medición de respuesta de sistemas acústicos a través de la tarjeta de sonido (Se va a utilizar extensamente en el capítulo 5.8) y también dispone de una función de

medida de impedancia. Para más información revisar la web:

<http://www.hometheatershack.com/roomeq/>

Es necesario realizar este montaje para calibrar la respuesta en frecuencia del sistema:

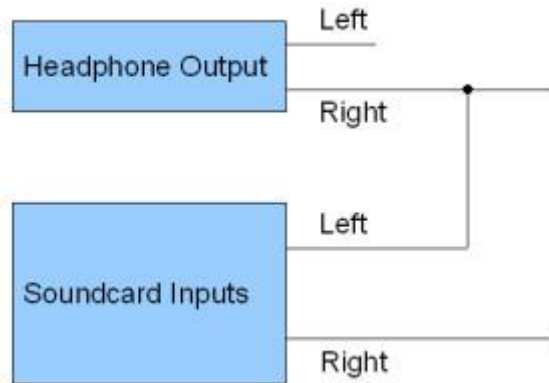


Figura 29. Calibración del sistema. Cortesía de REW.

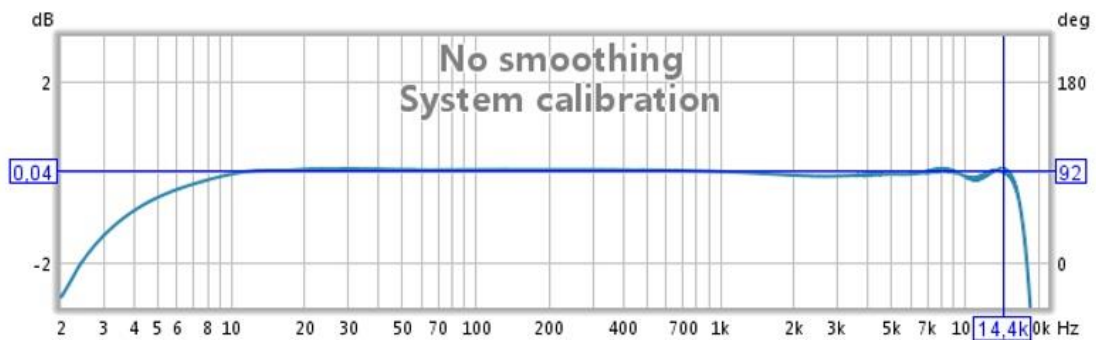


Figura 30. Respuesta en frecuencia del sistema

El programa generará un filtro inverso para corregir la respuesta en frecuencia y convertirla en plana. Algo muy similar a lo que se realizará en los siguientes capítulos de este proyecto.

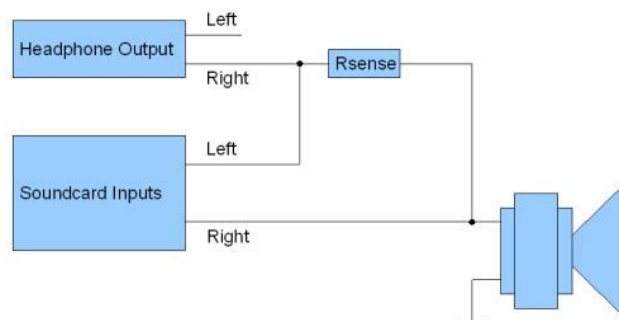


Figura 31. Montaje para realizar la medición de impedancia. Cortesía de REW.

Se ha implementado todo el montaje anterior para agilizar los procesos de medida y calibración.



Figura . Medidor de impedancia de precisión REW

Con todo el sistema calibrado y funcionando, se realiza una medición de la impedancia del altavoz, que debe estar alejado de cualquier objeto que pueda interferir en la medición debido a la transducción acústico-eléctrica. También se debe colocar colgado para evitar resonancias por el hecho de estar apoyado en una superficie.



Figura 32. Impedancia

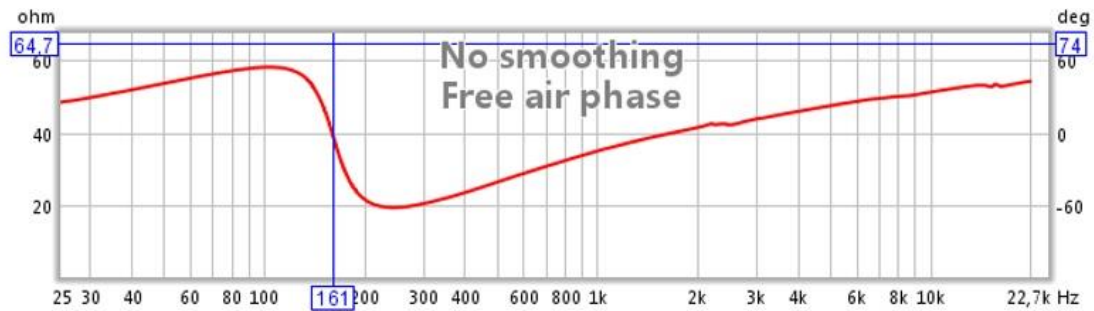


Figura 33. Fase. La fase es de 0° lo que verifica la aproximación del polo despreciable a alta frecuencia introducido por L_e

Datos obtenidos:

$$f_{resonancia} = 161 \text{ Hz}$$

$$Z_{resonancia} = 49,1\Omega \rightarrow R_2 = 49,1\Omega - 3,7\Omega = 45,3\Omega$$

$$R_{MS} = \frac{Bl^2}{R_2} = \frac{3,756^2}{45,3} = 0,3114 \text{ Kg/s}$$

La $f_{resonancia}$ la determinan C y L_2 .

$$f_{resonancia} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_2}}$$

Es necesario generar otra ecuación de forma que se puedan resolver ambas incógnitas. Para ello se va a añadir una masa conocida al diafragma, de forma que la frecuencia de resonancia se vea alterada y se puedan conocer las variables restantes. Para adherir la nueva masa al diafragma se utiliza un adhesivo comercial de fácil eliminado llamado Blu-tack®



Figura 34. Masa total añadida al diafragma 4,44 gramos



Figura 35. Altavoz con la nueva masa preparado para ser medido

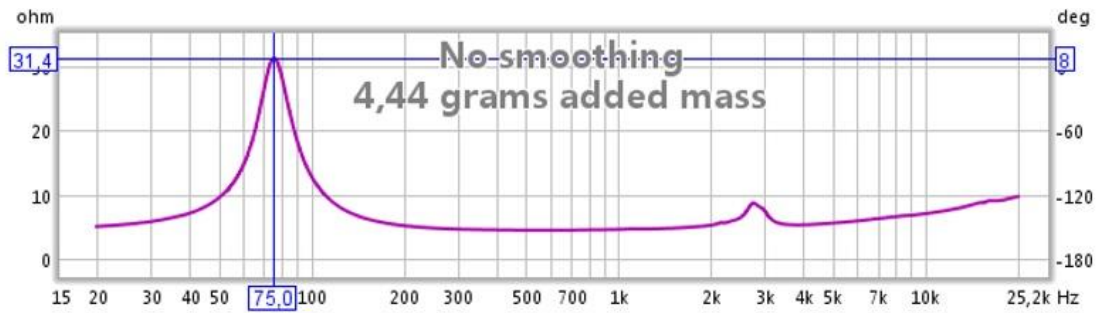


Figura 36. Impedancia con la nueva masa. Se puede observar una nueva resonancia parásita que ha aparecido en torno a 2,7 KHz. Este es el nuevo valor de cone-breakup que ha descendido de valor debido a que el diafragma ha perdido rigidez en proporción a su masa. Como se puede observar, la rigidez y ligereza del diafragma son críticos si se desea una extensa respuesta en frecuencia.

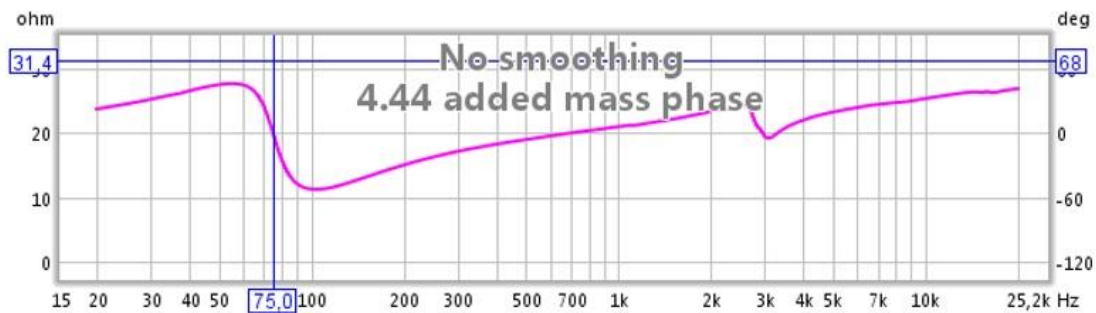


Figura 37. Fase con la nueva masa

Es interesante observar como también se ha visto modificado el factor de calidad Q de la resonancia y el valor de $Z_{resonancia}$. Si analiza el

$$f_{resonancia}' = 75 \text{ Hz}$$

$$f_{resonancia}' = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C + C_m) \cdot L_2}}$$

Desarrollando este sistema de ecuaciones:

$$C = \frac{C_m}{\left(\frac{f_{resonancia}'}{f_{resonancia}}\right)^2 - 1} = 1,21 \text{ gramos}$$

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{resonancia}'^2 \cdot C} = 7,997 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}$$

Como se han tomado referencias mecánicas (4,44 gramos) el término Bl^2 ha quedado incluido como constante.

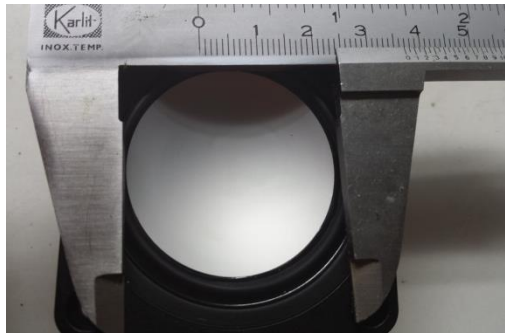


Figura 38. Medida del diámetro

$$S_D = 1,07 \cdot 10^{-3} m^2$$

	Valores fabricante	Valores medidos
Fs (Hz)	155	161
Re (Ω)	3,5	3,7
Le (mH)	0,02	0,027
1/Cms (m/N)	959,4	1250,5
Mmd (gramos)	1,04	1,21
Bl (N/A)	3,7	3,76
Sd (m2)	0,0013	0,0011

Tabla 3. Comparación de parámetros TS

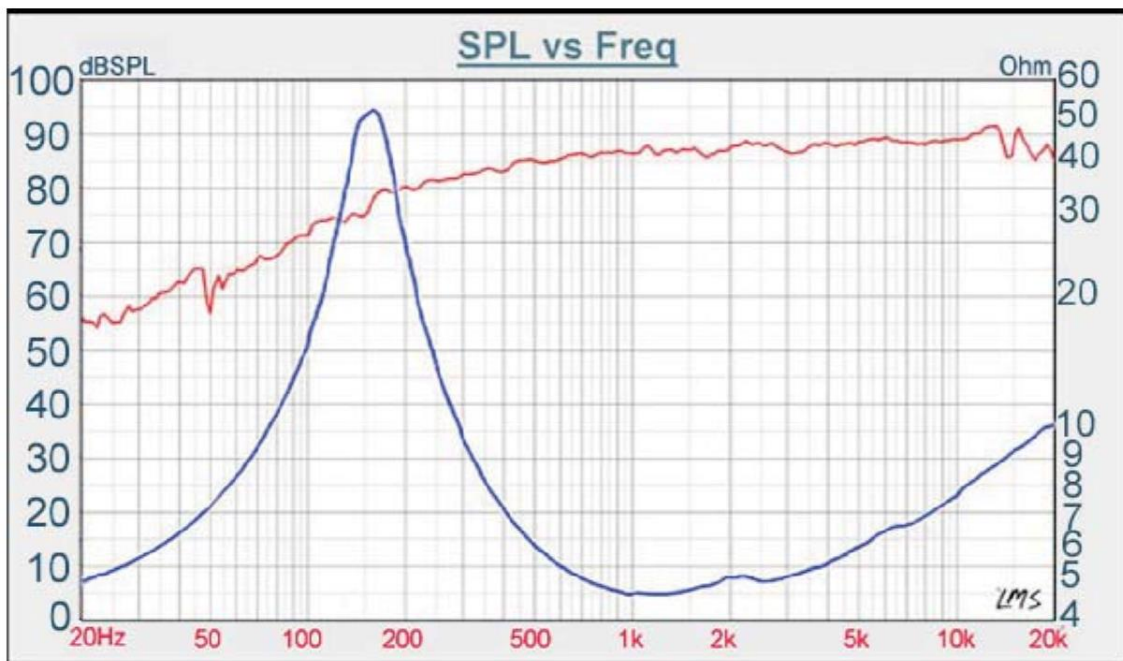


Figura 39. Impedancia y respuesta en frecuencia facilitada por el fabricante

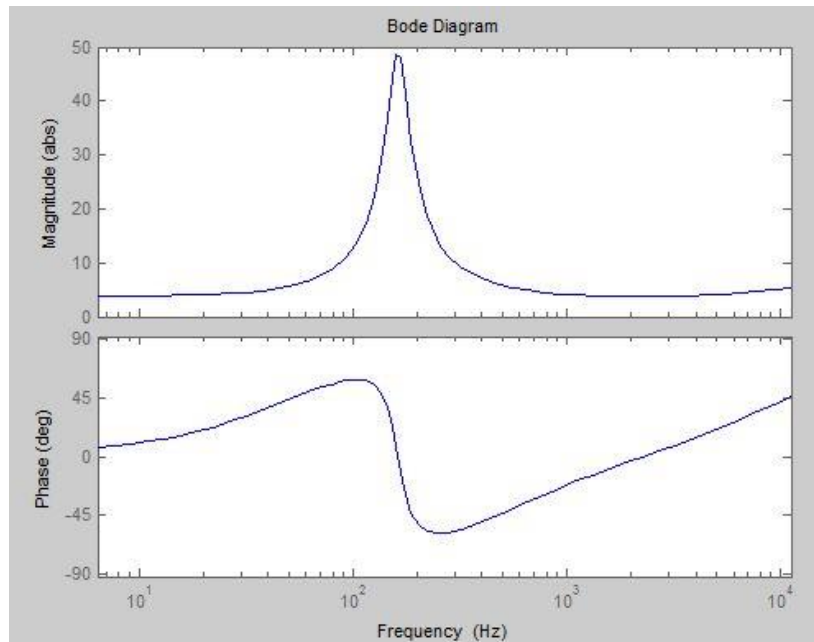


Figura 40. Impedancia del modelo eléctrico

También se realiza una simulación con la herramienta POWERGUI de MATLAB, una herramienta que permite simular circuitos eléctricos:

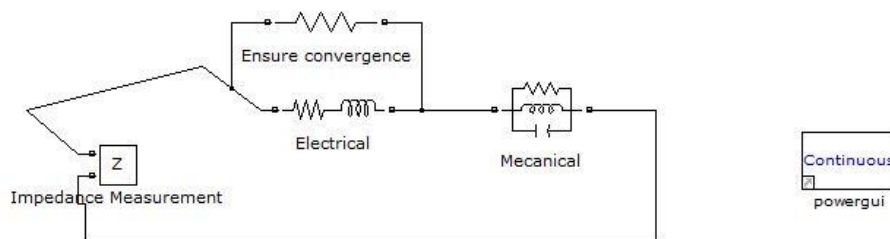


Figura 41. Circuito en POWERGUI

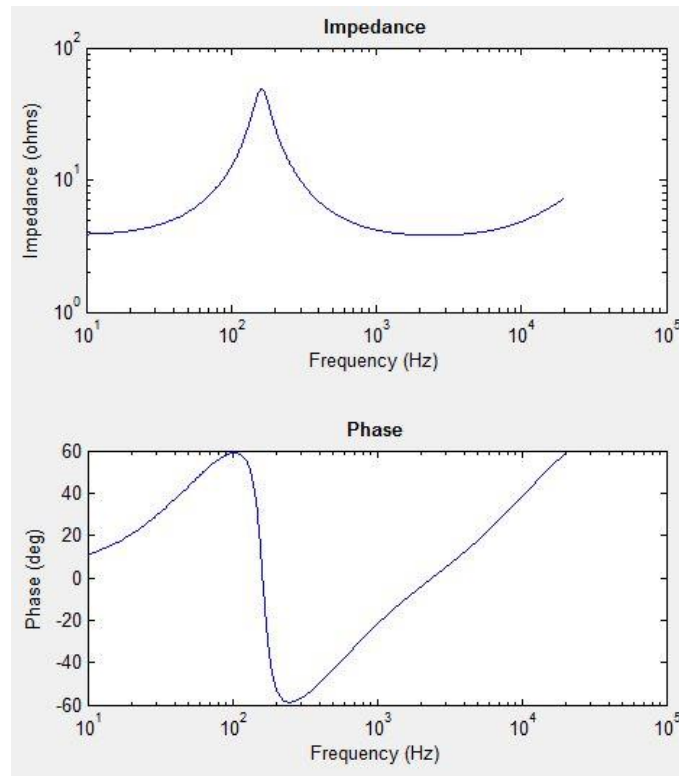


Figura 42.Simulación en POWERGUI

Ampliando las mediciones de impedancia, se observan unos picos extraños.

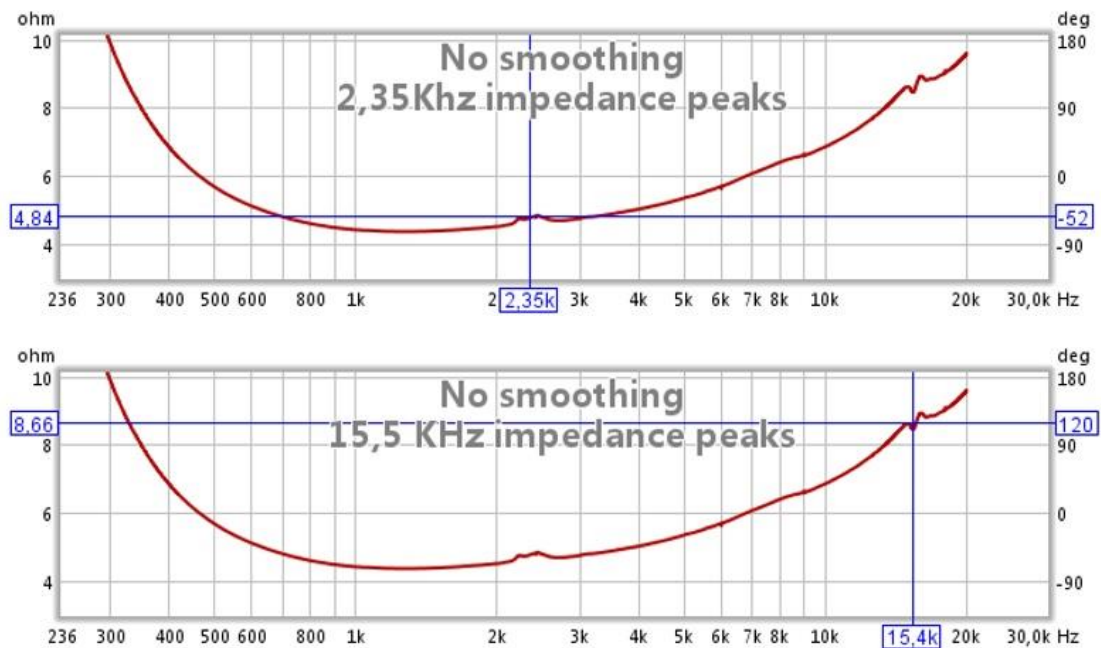


Figura 43. Los picos a 2,35KHz corresponden a resonancias desconocidas que se pueden dar por todo la estructura del altavoz. Por ejemplo la masa del imán con la compliancia del chasis (soporte que mantiene todos los elementos del altavoz), si este es muy débil. El tubo sobre el que se encuentra la bobina está fabricado de kapton (material con poco amortiguamiento mecánico) y también es un lugar propicio donde aparecen estas resonancias. A 15,5KHz se encuentra el cone-breakup.

5.5 Circuito acústico equivalente de un altavoz

En los apartados anteriores se han desarrollado los modelos mecánico y eléctrico de un altavoz dinámico. En este apartado se va a desarrollar el modelo acústico equivalente que se utiliza para conocer la respuesta del sistema desde el punto de vista de la transducción completa: de electricidad a sonido.

Partiendo de la analogía eléctrica equivalente de la figura 18, se elimina el transformador esta vez dividiendo la impedancias del primario, porque se busca observar el circuito desde el punto de vista del sonido, que se encuentra en el secundario.

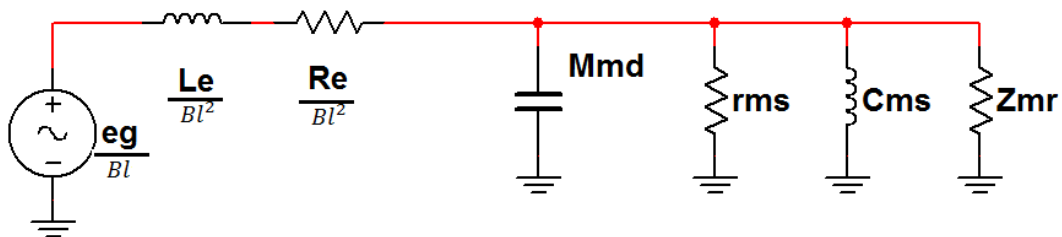


Figura 44. Circuito electro-mecánico referido al secundario

Se realiza una transformación de Thevenin a la parte eléctrica:

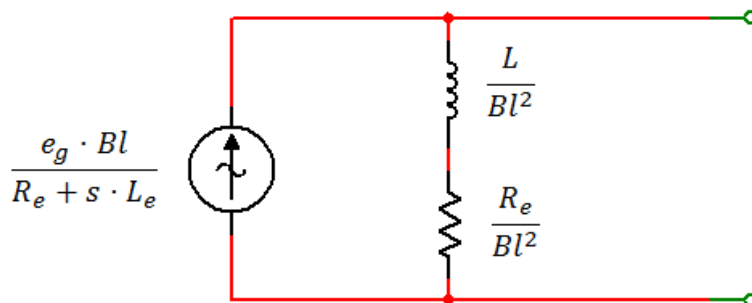


Figura 45. Transformación a fuente de corriente

Se realiza ahora la transformación inversa, forzando al generador a mantener el mismo valor: esto genera una inversión de impedancias al ser divididas entre su mismo valor al cuadrado (Potencia = constante).

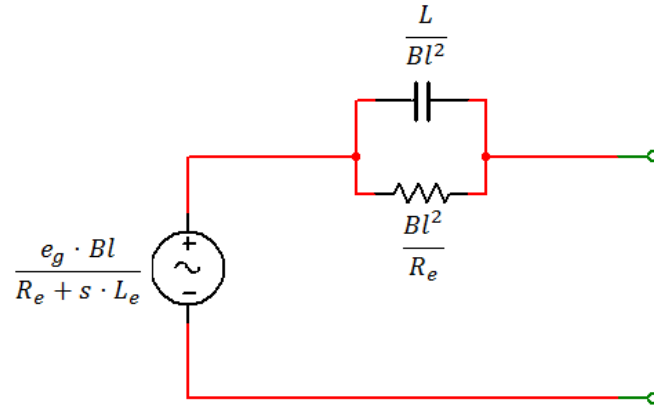


Figura 46. Generador de fuerza transformado

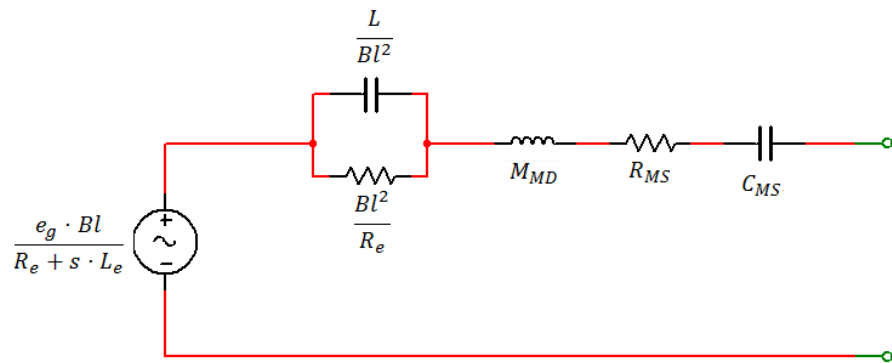
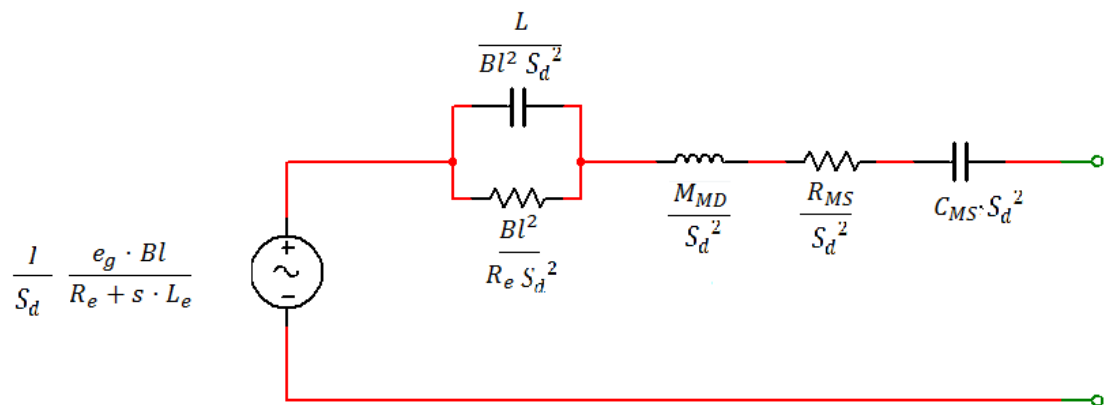


Figura 47. Circuito equivalente electro-mecánico serie visto desde el secundario

Por último, para convertir este modelo mecánico en acústico, la impedancia de los elementos se tiene que dividir entre S_d^2 y entre S_d la fuente. Se definen entonces los nuevos parámetros acústicos.



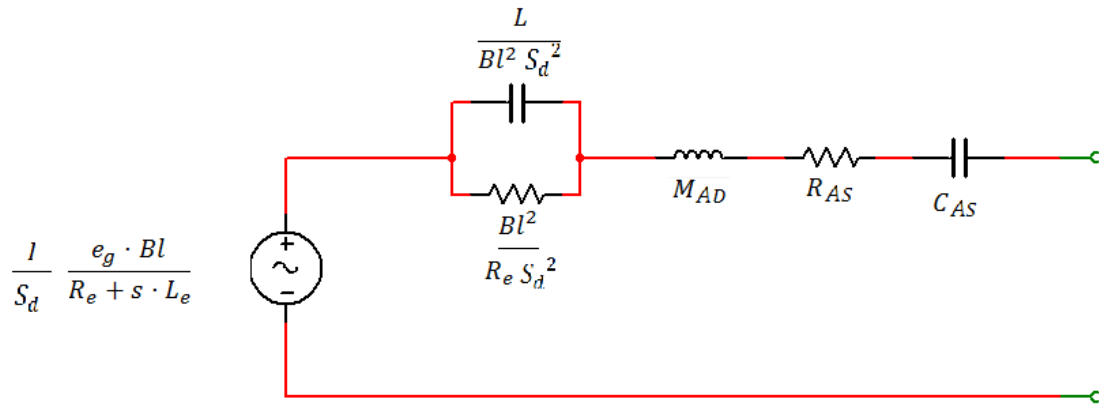


Figura 48. Circuito acústico equivalente completo

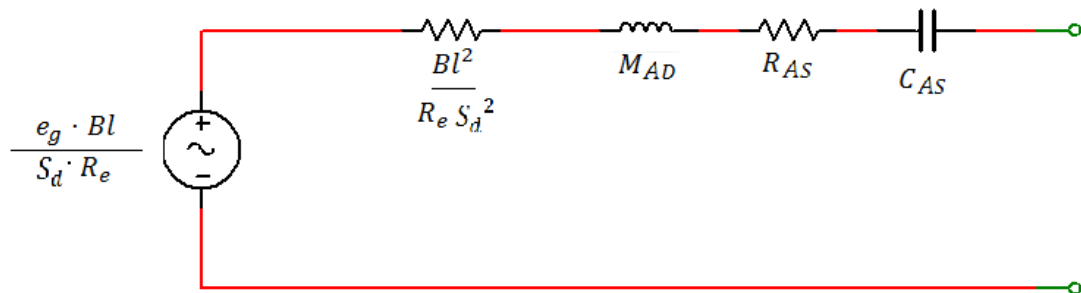


Figura 49. Circuito acústico equivalente aproximado

La principal motivación de realizar estos cálculos, es la de comprobar que no se dispara el Q de la resonancia mecánica cuando se incluya la cámara anecoica. Se utilizará el circuito aproximado de la figura 49 que ofrece resultados prácticamente iguales a baja frecuencia que el circuito completo de la figura 48.

Cas (m5/N)	$9,677 \cdot 10^{-10}$
Mad (kg/m4)	1000
Ras (Ω acústicos)	257355

5.6 Análisis acústico de la cámara anecoica

Acústicamente, una cámara anecoica de pequeño tamaño actúa como una compliancia. De tal modo que la impedancia de radiación interna tiene valor reactivo y resistivo. La reactancia de radiación viene definida por:

$$Z_{AB} = \frac{1}{sC_{AB}}$$

Z_{AB} : impedancia acústica de la cámara

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma \cdot P_o}$$

Sustituyendo :

$$Z_{AB} = \frac{\gamma \cdot P_o}{sV_B}$$

C_{AB} : *compliance acústica de la cámara en m^5/N*

V_B : *volumen de la cámara en m^3*

γ : *constante adiabática (1,4 para el aire)*

P_o : *presión atmosférica en Pa*

Esta reactancia de radiación va acompañada de una resistencia de pérdidas en paralelo. El valor de esta resistencia no es crítico, no obstante se revisa en tablas empíricas del libro Acoustics de Leo L. Beranek, Copyright 1954 edición de 1993, páginas 116-128

La resistencia de radiación es variable con la frecuencia y también es necesario consultar tablas o realizar cálculos complejos. Para frecuencias altas la resistencia de radiación es constante (se toma este valor) y viene definida por:

$$R_{AB} = \frac{\rho_o \cdot V_s}{\pi \cdot a^2} = 370 \text{ K}\Omega$$

ρ_o : *densidad del aire en $\frac{kg}{m^3}$*

V_s : *velocidad del sonido $\frac{340m}{s}$*

a : *radio del diafragma del altavoz en metros*

Existe una impedancia de radiación por cada lado del diafragma. La impedancia que ofrece la cámara es varios órdenes de magnitud superior a la que ofrece el aire libre, por tanto se desprecia.

Se calcula con un volumen de prueba equivalente a un cilindro de 9 cm de largo y de S_d de base:

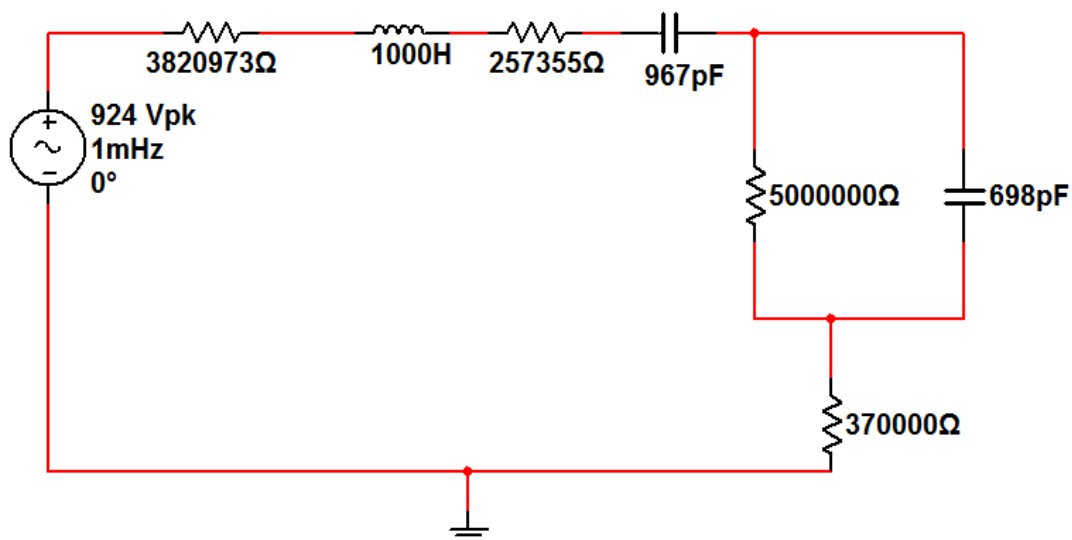


Figura 50. Circuito acústico cámara anecoica 9cm

La presión acústica dentro de la cámara es equivalente a la tensión que cae a través de la impedancia de radiación.

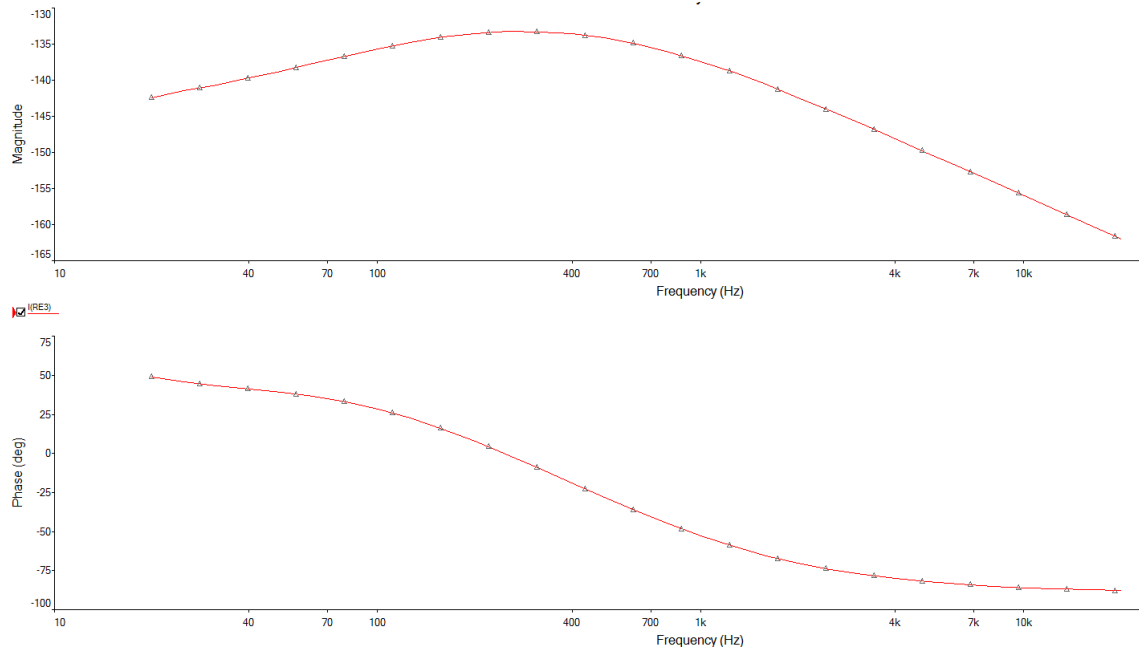


Figura 51. Respuesta en frecuencia simulada mediante la herramienta AC análisis perteneciente al software Multisim

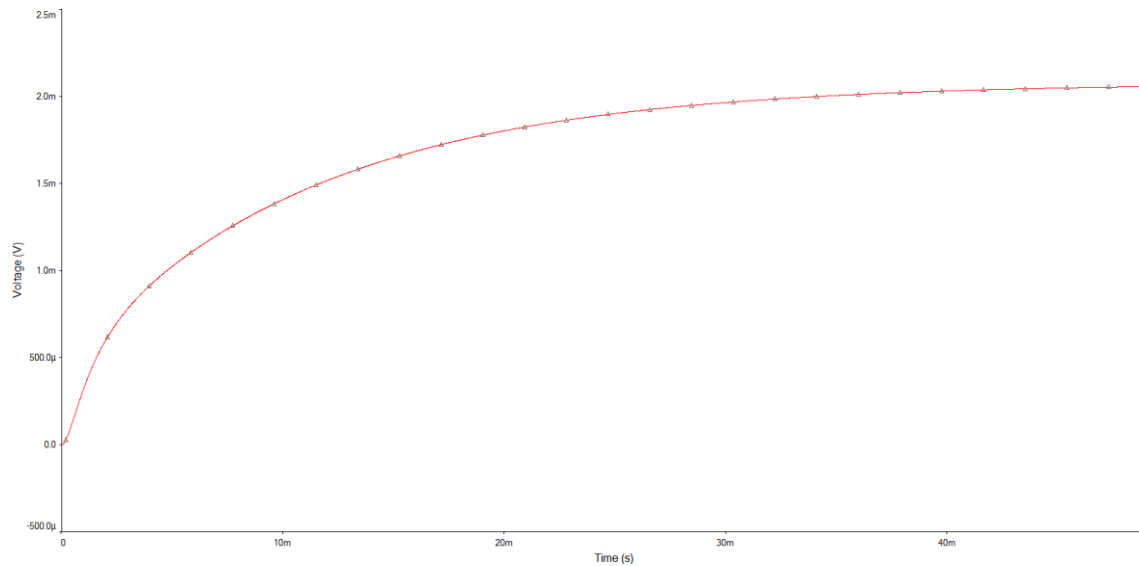


Figura 52. Respuesta transitoria

Como se puede observar, el sistema funciona libre de resonancias de alto Q difíciles de filtrar.

5.7 Construcción de una cámara de prueba

Una vez simulado el buen funcionamiento del sistema se procede a la construcción de una simple cámara anecoica de prueba. Esta cámara se fabrica en un material barato, fácil de mecanizar y con un comportamiento acústico decente (libre de resonancias de alto Q): la madera. La cámara es desmontable y consta de varias piezas.

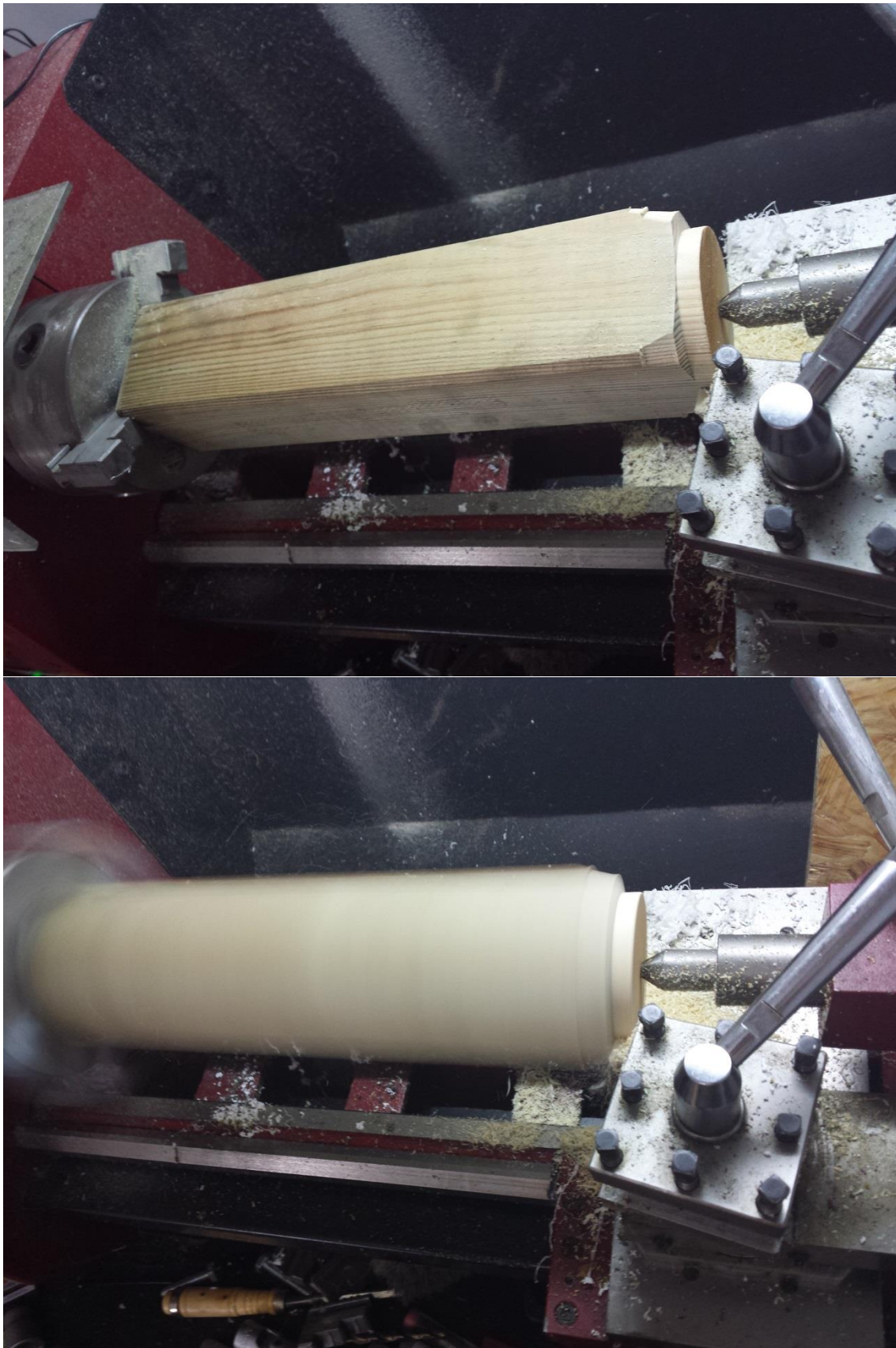


Figura 53. Torneado de las piezas de la cámara anecoica de prueba

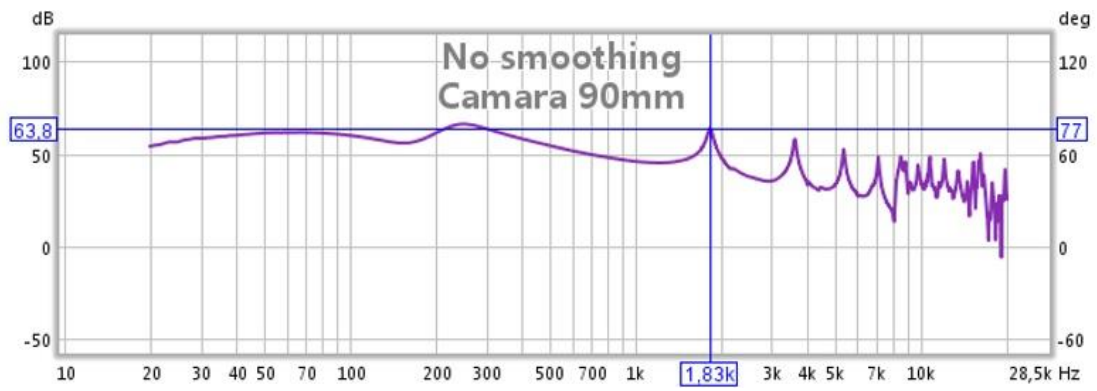


Figura 54. Cuerpos de cámara terminados

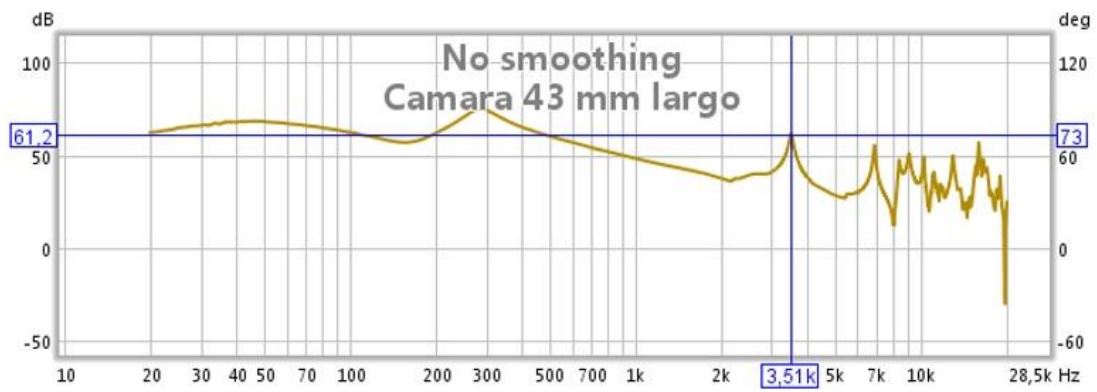


Figura 55. Cámara anecoica de prueba terminada, micrófono de calibración ECM8000 y altavoz W2-800SL montados en su posición.

5.8 Mediciones sobre la cámara anecoica de prueba y cámara definitiva



Respuesta cámara de 90mm de largo



Respuesta cámara de 43mm de largo

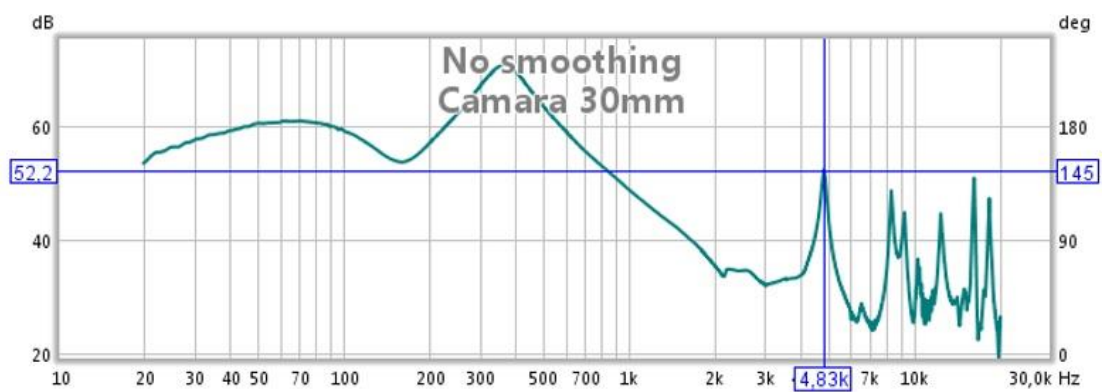


Figura 56. Respuesta cámara de 30 mm de largo

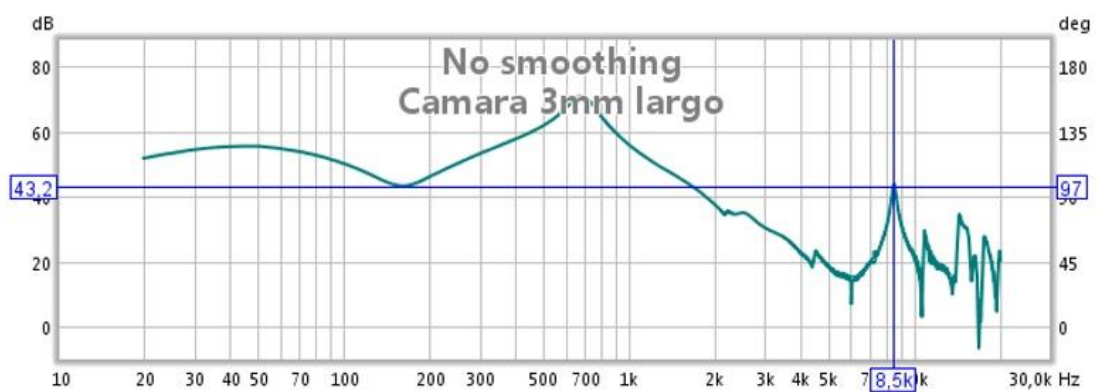


Figura 57. Respuesta cámara de 3 mm de largo

Se observa que la respuesta en frecuencia para la cámara de 90mm de largo concuerda con las simulaciones con la resonancia mecánica situada en torno a 220 Hz. Para valores de cámara más pequeños, la compliancia acústica equivalente disminuye, aumentando la frecuencia a la que se produce la resonancia mecánica y aumentando el factor de calidad Q de la misma.

Por otro lado, se observa la aparición de picos y valles en la respuesta en alta frecuencia, éstas son las denominadas resonancias de línea de transmisión. Una línea de transmisión acústica es un recinto por el que se propaga un sonido de una longitud de onda tal comparable a las dimensiones del recinto que genera una distribución heterogénea de la presión.

En este caso, el símil es un tubo cerrado por un extremo con el altavoz en otro, de longitud igual a la de la cámara.

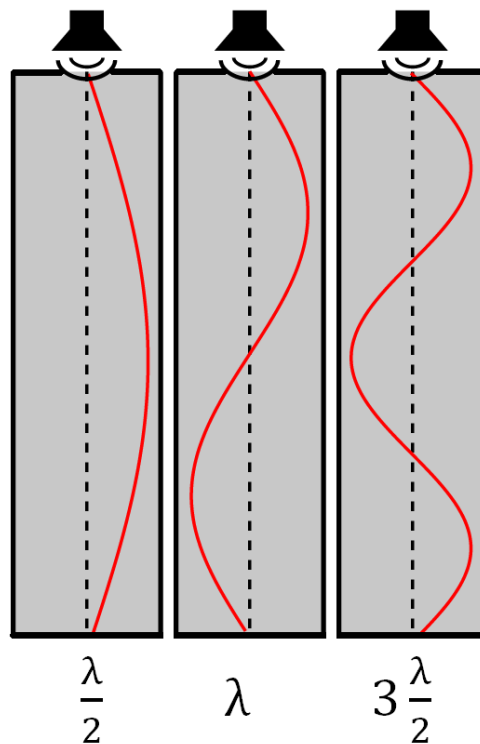


Figura 58. Resonancias de línea de transmisión cerrada. La línea roja indica velocidad. La presión es inversamente proporcional a la velocidad: donde exista un valle de velocidad, habrá un pico de presión.

La primera resonancia aparece en media onda, la siguiente en onda completa, 3/2 longitudes de onda... etc. Por tanto las frecuencias a las que existe una resonancia de línea de transmisión son:

$$f = \frac{(2 \cdot n) V_s}{4 L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{etc}$$

V_s : velocidad del sonido

L : longitud del tubo

	90	1	2	3	4	5	6	7	8
Cámara real		1830	3700	5200	7000	8200	9800	10100	12000
Cámara ideal		1888,8888889	3777,777778	5666,666667	7555,555556	9444,444444	11333,33333	13222,22222	15111,11111
	43								
Cámara real		3510	7000	8200	9000	10000	10800	11500	13000
Cámara ideal		3953,4883721	7906,976744	11860,46512	15813,95349	19767,44186	23720,93023	27674,4186	31627,90698
	30								
Cámara real		4830	8200	9050	10100	13000	16000	18000	
Cámara ideal		5666,6666667	11333,33333	17000	22666,66667	28333,33333	34000	39666,66667	45333,33333
	3								
Cámara real		8500	10500	13000	18000				
Cámara ideal		56666,666667	113333,3333	170000	226666,6667	283333,3333	340000	396666,6667	453333,3333

Tabla . Frecuencia de resonancia de línea de transmisión: comparación entre los valores teóricos y medidos para las diferentes longitudes de cámara.

En la primera resonancia se encuentra una buena equivalencia entre la teoría y la medida de todas las cámaras excepto en la de 3 mm. El valor medido siempre es menor de lo esperado debido a que a altas frecuencias, como ya se ha explicado en el capítulo 5.5, el altavoz se comporta como una masa, disminuyendo frecuencia de resonancia del acoplamiento línea de transmisión-altavoz. En cambio, existen discrepancias en:

- Cámara 90 mm: $n=5,6,7,8$
- Cámara 43 mm: $n=3,4,5,6,7,8$
- Cámara 30 mm: $n=2,3,4,5,6,7,8$
- Cámara 3 mm: $n=1,2,3,4,5,6,7,8$

El caso más evidente sucede en la cámara de 3mm, cuya primera resonancia de línea de transmisión debería aparecer a 57kHz y en su lugar lo hace a 8,5Khz. Se observa que existe una frecuencia igual para todas las cámaras, independientemente de su largo, en la que existe una resonancia y curiosamente es donde comienzan las discrepancias.

	90	1	2	3	4	5	6	7	8
Cámara real		1830	3700	5200	7000	8200	9800	10100	12000
Cámara ideal		1888,8888889	3777,777778	5666,666667	7555,555556	9444,444444	11333,33333	13222,22222	15111,11111
	43								
Cámara real		3510	7000	8200	9000	10000	10800	11500	13000
Cámara ideal		3953,4883721	7906,976744	11860,46512	15813,95349	19767,44186	23720,93023	27674,4186	31627,90698
	30								
Cámara real		4830	8200	9050	10100	13000	16000	18000	
Cámara ideal		5666,6666667	11333,33333	17000	22666,66667	28333,33333	34000	39666,66667	45333,33333
	3								
Cámara real		8500	10500	13000	18000				
Cámara ideal		56666,666667	113333,3333	170000	226666,6667	283333,3333	340000	396666,6667	453333,3333

Esa frecuencia equivale a una línea de transmisión cerrada de 2 cm de largo. Dentro de la cámara no hay ninguna dimensión de 2cm, pero si la hay de 4cm: el diámetro del altavoz y de la cámara. La distribución de presiones es compleja, se genera una variación de presión tanto radial como axial, con picos de presión en el eje en los extremos de la cámara y picos de velocidad a $\pm r/2$ en el medio de la cámara.

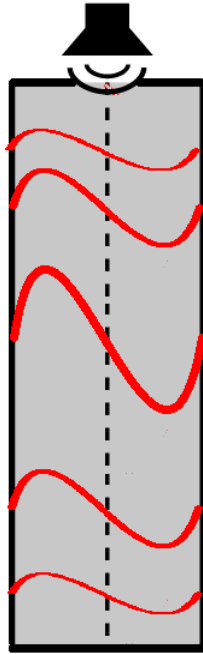


Figura 59. Primera resonancia axial

La respuesta en frecuencia es extremadamente compleja como para ser filtrada de ninguna manera, además existen valles profundos que limitan totalmente la presión máxima que se puede conseguir a esas frecuencias, incluso suministrando al altavoz su potencia máxima, el nivel global de SPL en respuesta plana disminuiría notablemente.

Sólo existe una forma práctica de suavizar la respuesta: aumentando las pérdidas acústicas. Se rellena el interior de la cámara con fibra de poliéster, cuyos filamentos minúsculos generan una gran resistencia al paso de ondas de velocidad, lo que disminuirá notablemente las ondas estacionarias. La presión en cambio, no se ve afectada por esta resistencia acústica, puesto que nuestra impedancia al final del tubo tiene a infinito (tubo cerrado).



Figura 60. Fibra de poliéster

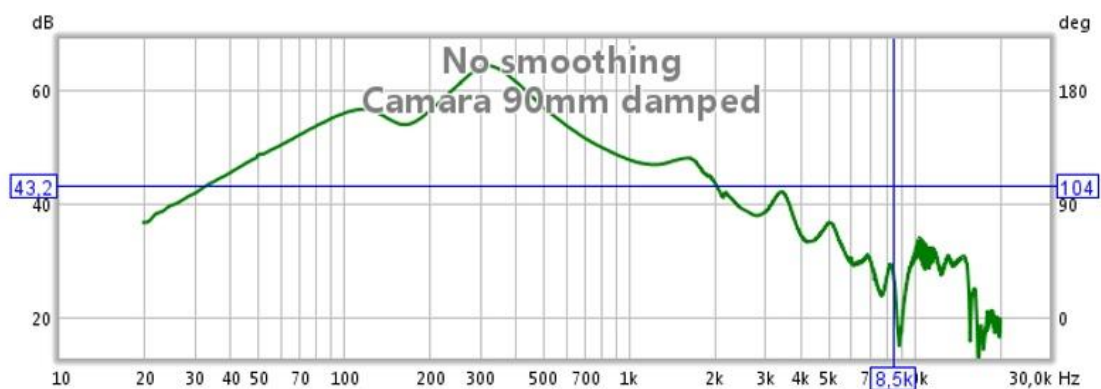


Figura 61. Cámara amortiguada con fibra de poliéster

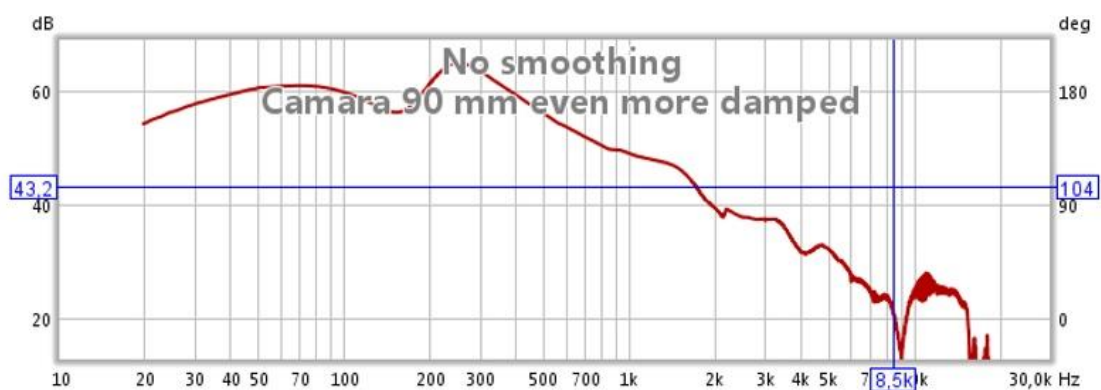


Figura 62. Cámara muy amortiguada con fibra de poliéster

El comportamiento visco-acústico de la fibra de poliéster tiene relación con su acabado superficial, anchura de fibra, densidad y el nivel de enredo de las mismas. Por tanto su comportamiento es muy difícil de prever. Se realizan varias medidas iterativas hasta encontrar la cantidad necesaria.

Se fabrica una segunda cámara anecoica utilizando lo aprendido de la cámara anterior, con un material más caro, duradero y de mejor calidad, el pvc.



Figura 63. Cámara anecoica definitiva con el micrófono y el altavoz situados en su posición.

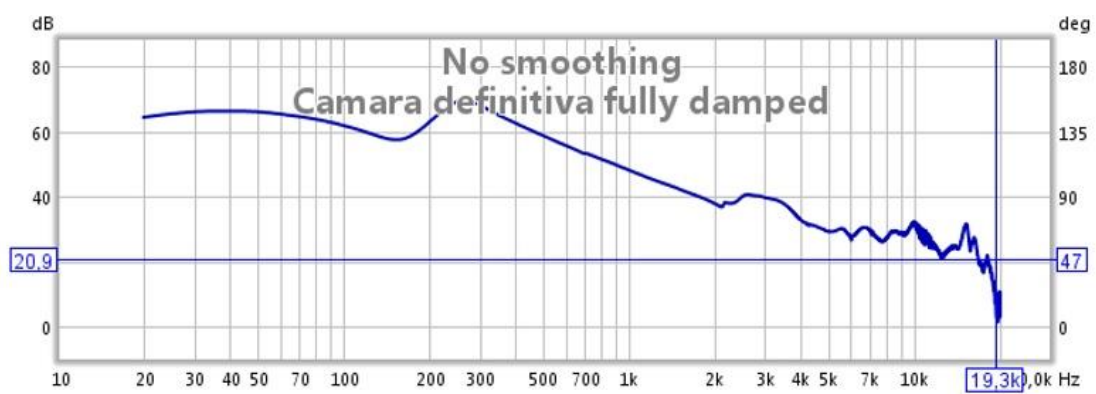


Figura 63b. Respuesta en frecuencia de la cámara definitiva.

Las resonancias internas están casi completamente amortiguadas y aunque su contribución a la respuesta en frecuencia es ahora menor, no sucede lo mismo con la fase, que se mantiene alterada, debido a la inherente presencia de las resonancias.

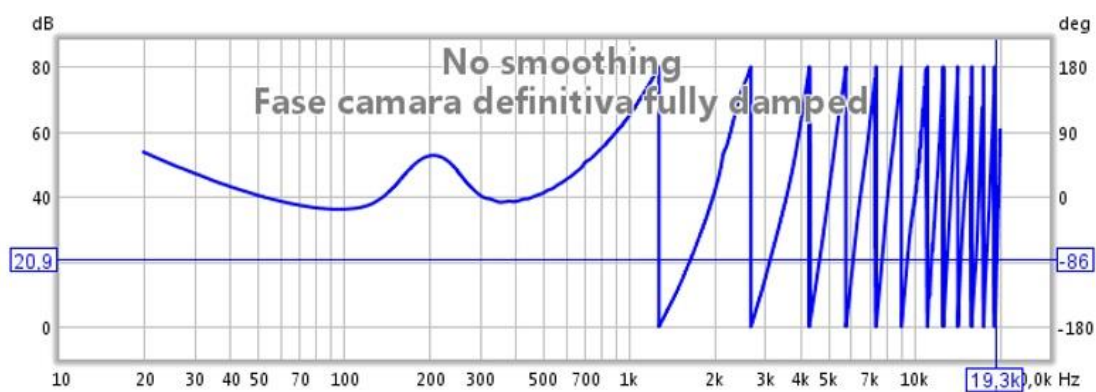


Figura 64. Respuesta en fase de la cámara definitiva

Por último se genera un waterfall con los datos almacenados. El decaimiento de las resonancias restantes es rápido y equivalente en todas las frecuencias.

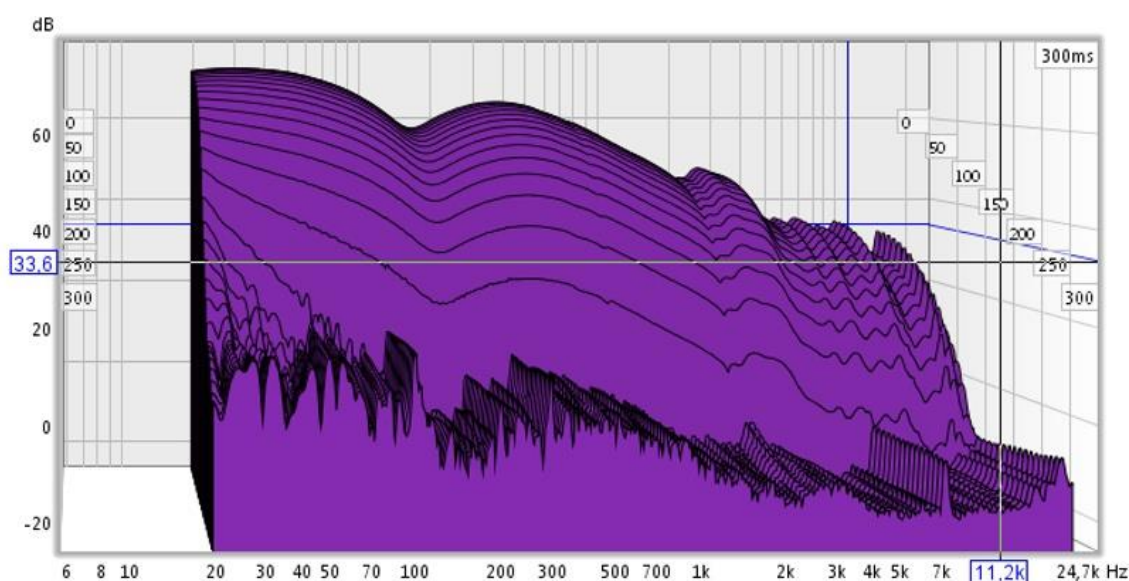


Figura 65. Waterfall cámara definitiva.

RT60 (tiempo a partir del cual la reverberación/eco ha descendido 60dB) = 100ms

Esta cámara presenta una respuesta en frecuencia lo suficientemente homogénea como para ser filtrada mediante filtros digitales o analógico-digitales sin una potencia de procesamiento excesiva.

5.9 Implementación del filtro analógico

El objetivo es convertir la respuesta en frecuencia de la cámara actual en plana. Para ello se puede implementar un filtro digital que modifique la magnitud de cada frecuencia y consiga ecualizar la respuesta. Existe un problema en este procedimiento, en la cámara, de 20 Hz a 20kHz hay una variación de casi 70 dB, esto es 3162 veces más ganancia a 250 Hz que a 20 KHz. El filtro digital incrementará la ganancia de cada frecuencia lo suficiente como para ecualizar el sistema. Esto supone que a 250 Hz el conversor D/A de la tarjeta de sonido utilizará al menos 11 bits de cuantificación menos que a 20 kHz.

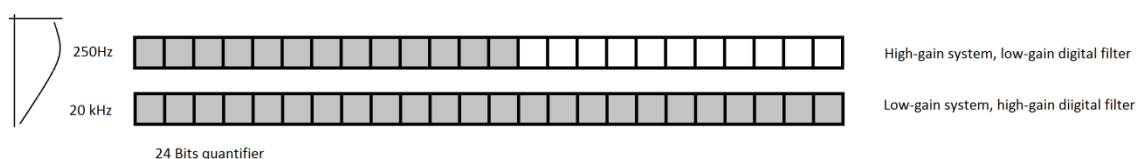


Figura 66. Equivalencia en cuantificación a diferentes frecuencias para la respuesta en frecuencia de la cámara anecoica

Para equilibrar la cuantificación en todo el espectro se implementa un filtro paso-alto analógico de segundo orden, cuya frecuencia de resonancia se encuentre en torno a los 20 kHz. Este filtro supondrá una pendiente de 40dB/dec. ó 12dB/octava.

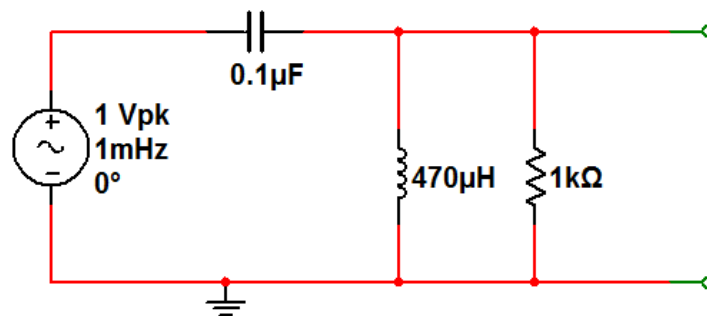


Figura 67. Filtro analógico paso alto

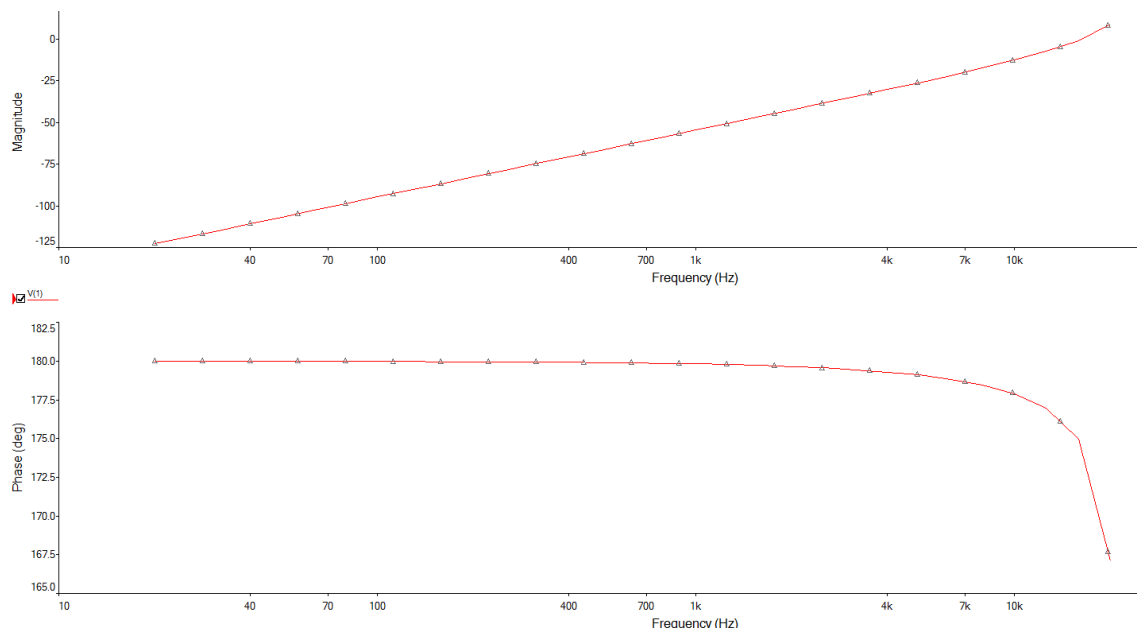


Figura 68. Respuesta en frecuencia del filtro analógico

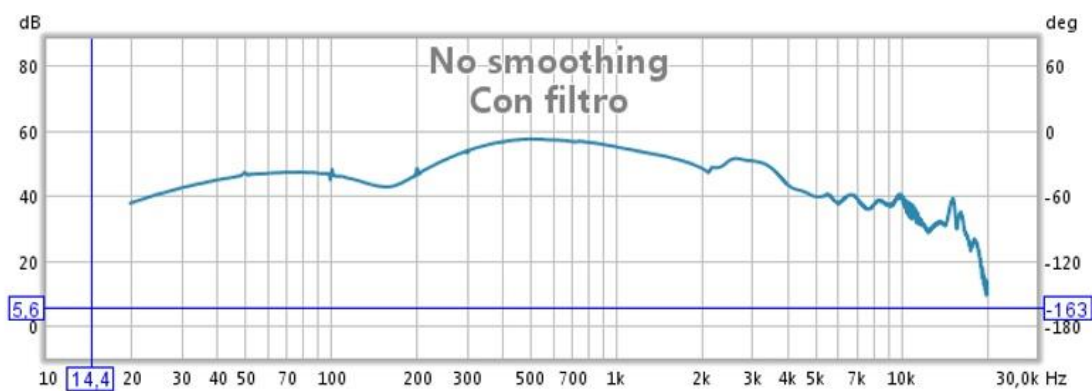


Figura 69. Respuesta en frecuencia de la cámara con el filtro analógico

La diferencia de ganancia en el espectro es ahora de 30dB lo que supone una pérdida de 5 bits en la cuantificación D/A a 500Hz. Comparándolo con los 11 bits anteriores, es una gran mejora.

5.10 Fuente de alimentación y amplificador de potencia

El amplificador de potencia elegido para la aplicación es el TDA7264. Este amplificador cumple sobradamente con las especificaciones de potencia y además es estéreo, lo que facilita una posible ampliación futura, ya sea de potencia (utilizando ambos amplificadores) o para utilizarlo en otra aplicación. Aquí se pueden ver algunas de las gráficas que aparecen en el datasheet. Para mas información consultar el anexo.

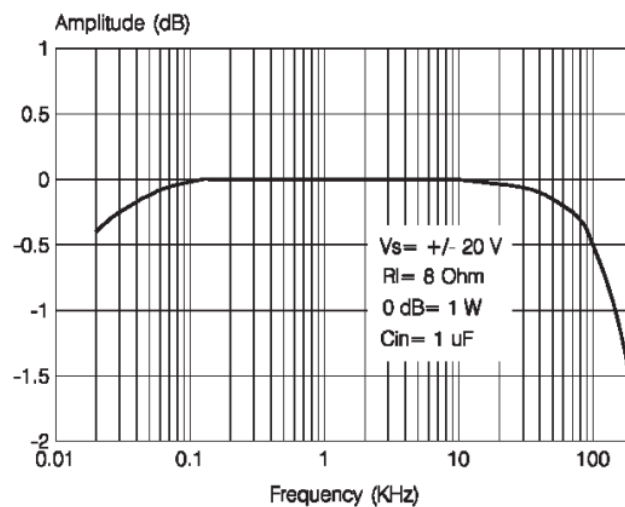


Figura 70. Respuesta en frecuencia. Se puede observar una respuesta prácticamente plana entre 20 Hz y 20 kHz.

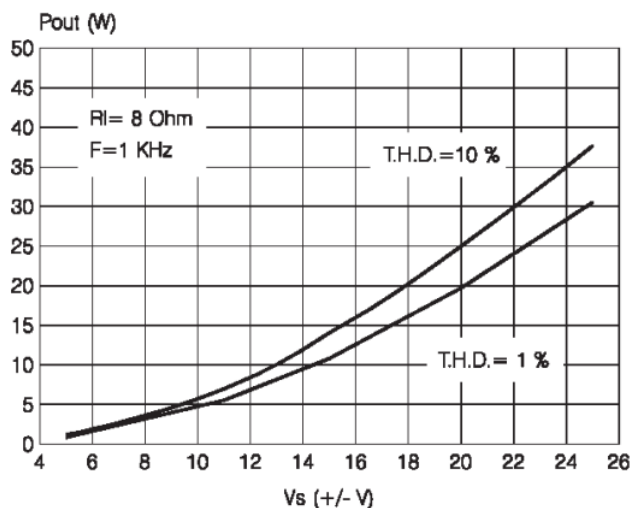


Figura 71. Potencia entregada a una carga de 8 ohms respecto a la tensión de entrada dual.

Evidentemente este amplificador es capaz de entregar mucha más potencia de lo que el altavoz es capaz de soportar. La razón fundamental de elegir un amplificador de mayor

potencia es la de limitar la distorsión armónica, que como se puede ver en la siguiente figura, depende de la potencia y especialmente de la relación potencia/potencia máxima. Este amplificador, trabajando holgadamente, genera poca distorsión armónica:

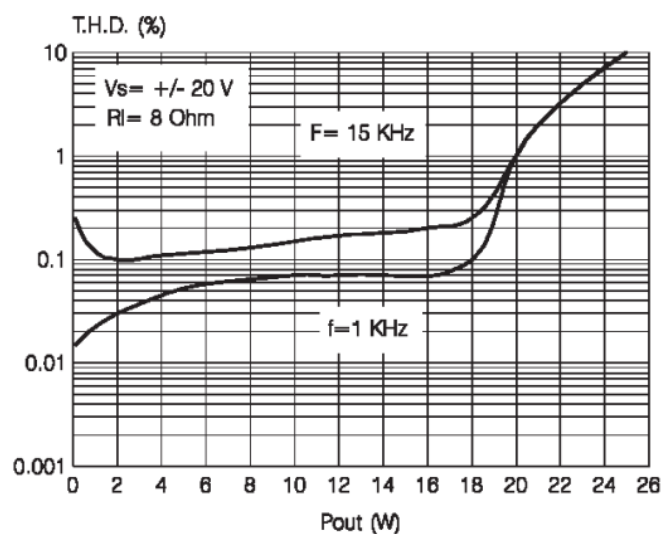


Figura 72. Distorsión armónica en función de la potencia.

En este caso **la relación señal ruido es de 60dB**. Para aumentar la relación señal ruido se puede usar el amplificador integrado en la tarjeta de sonido, aunque la potencia es demasiado baja. Para altos volúmenes se sacrifica SNR y se utiliza este amplificador, para alta SNR se utiliza el amplificador integrado.

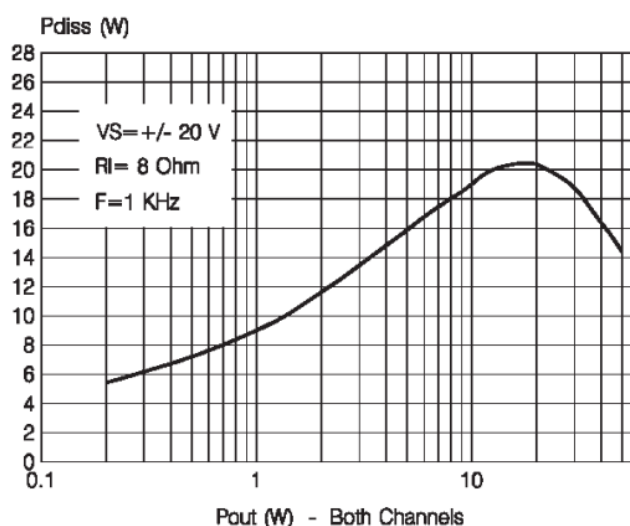


Figura 73. A máxima potencia se disiparán unos 20W por canal.

Este amplificador dispone de un modo mute, el cual no va a funcionar normalmente, únicamente cuando se encienda el dispositivo se encontrará en modo mute y una vez las tensiones de alimentación hayan llegado a valores correctos, el amplificador pasará a modo normal.

Figure 11: Attenuation & Total Quiescent Current vs. V_{pin4} Voltage

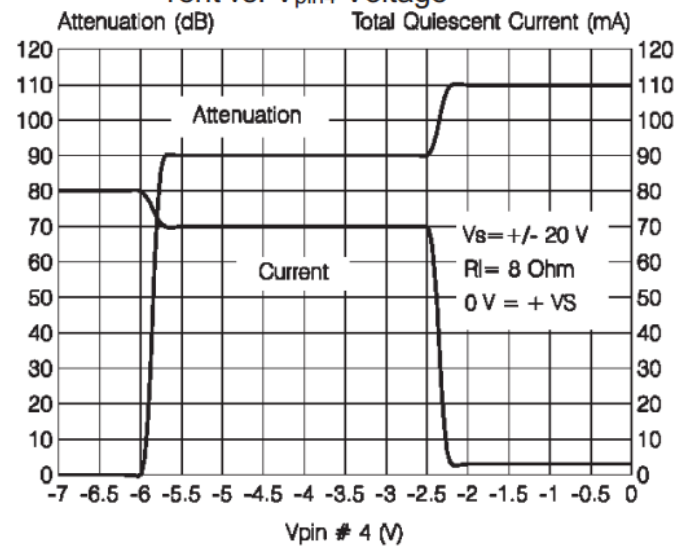


Figura 74. Modos de funcionamiento en función de la tensión en el pin 4.

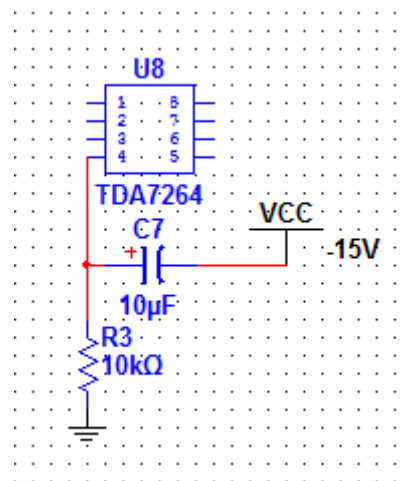


Figura 75. Circuito temporizador de mute

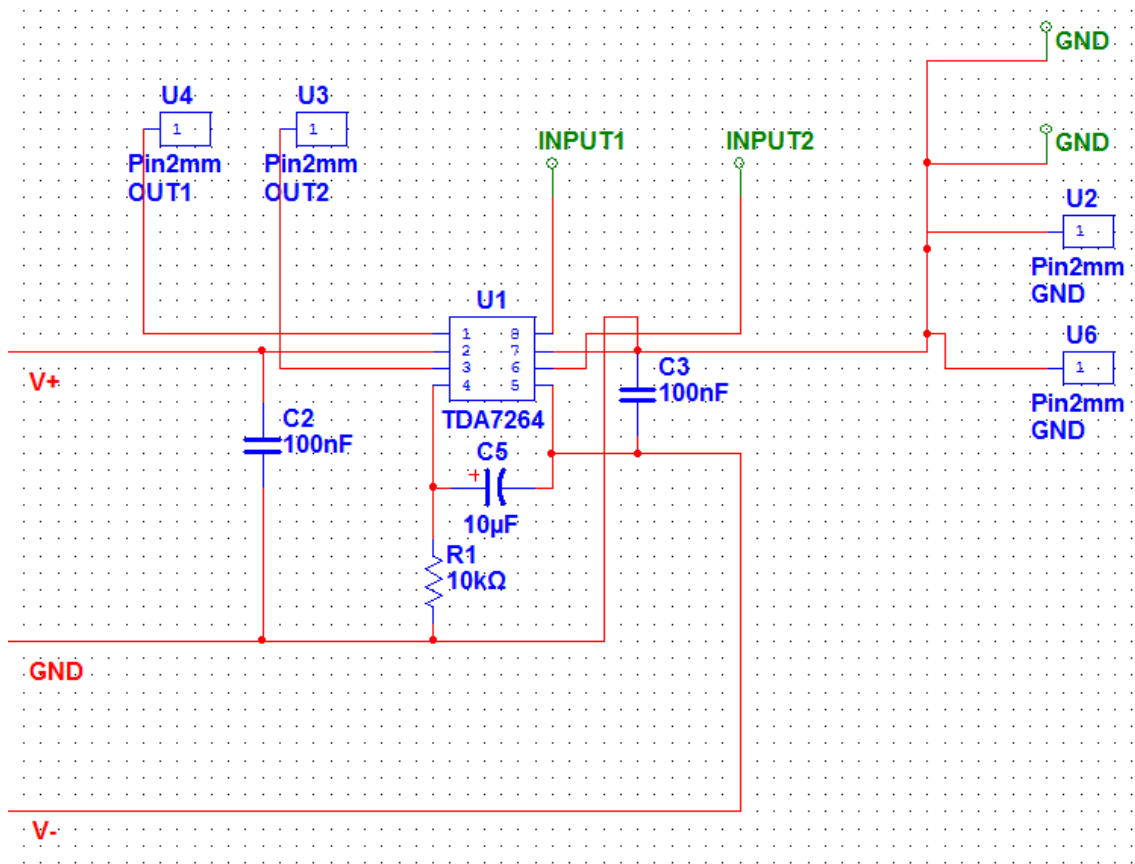


Figura 76. Circuito completo amplificador

La fuente de alimentación consta de un transformador, rectificación de media onda y un filtro. La rectificación de media onda obliga a utilizar uno de los cables que provienen del transformador directamente como masa. Esto no incumple ninguna normativa de seguridad eléctrica puesto que el circuito se encuentra aislado de la red mediante el transformador.

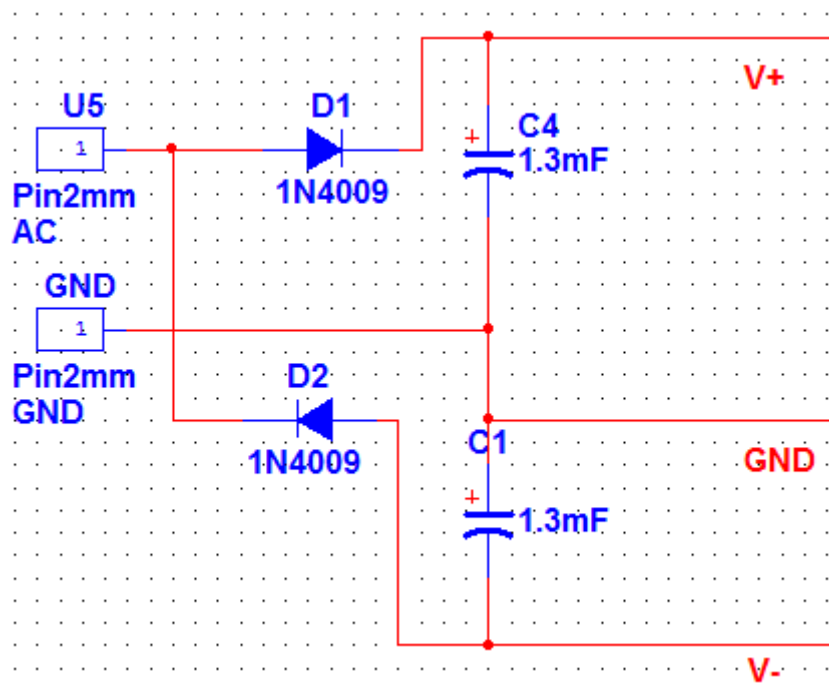


Figura 77. Rectificación y filtrado.

El PCB se diseña utilizando la herramienta Ultiboard.

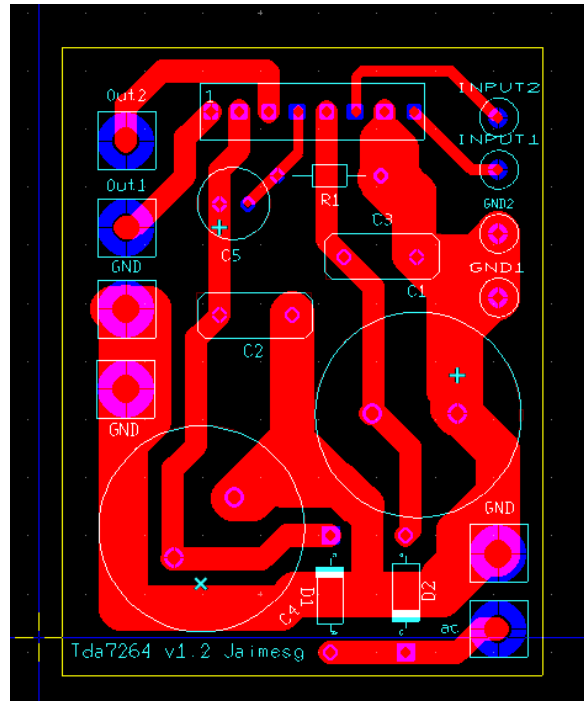


Figura 78. PCB en Ultiboard.

En el anexo se puede encontrar un modelo a escala 1:1 del circuito que facilitará una futura copia en caso de ser necesaria.



Figura 79. Circuito y fuente de alimentación



Figura 80. Transformador de bajo coste de 11,5V y 3,9A utilizado normalmente en bombillas halógenas.

6. Programa de medición en Matlab

En este capítulo se describe la realización de un programa en Matlab capaz de medir la respuesta en frecuencia de un sistema acústico. Para realizar la medición el software genera

un ruido blanco a la vez que realiza una grabación de ese mismo ruido blanco una vez que ha atravesado el sistema.

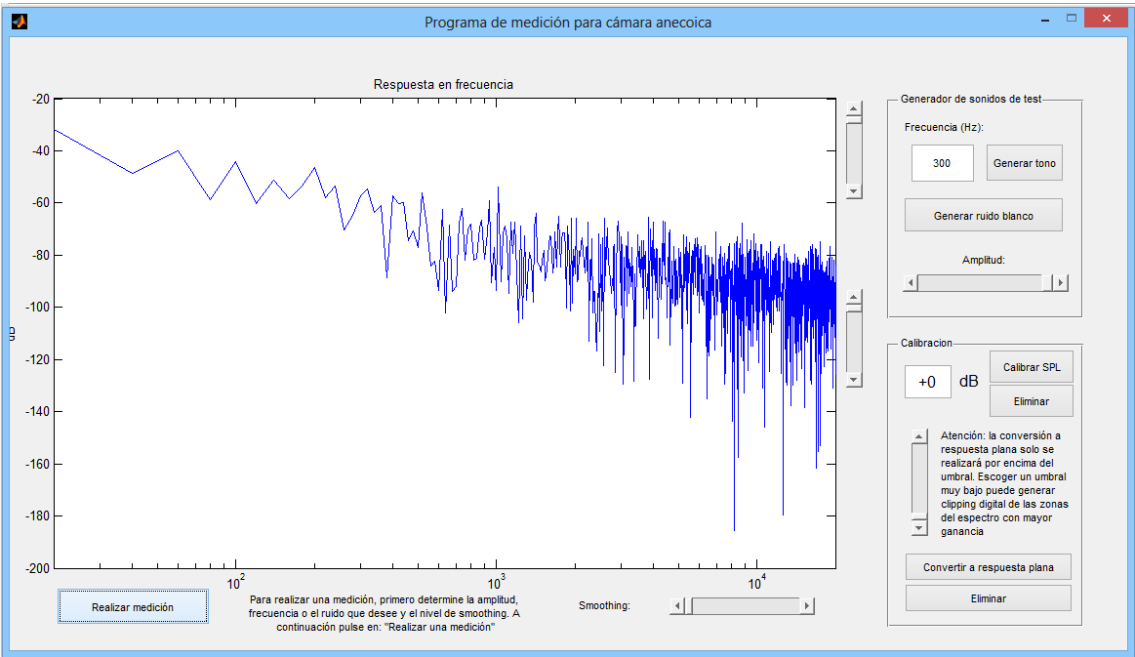


Figura 81. Interfaz gráfica

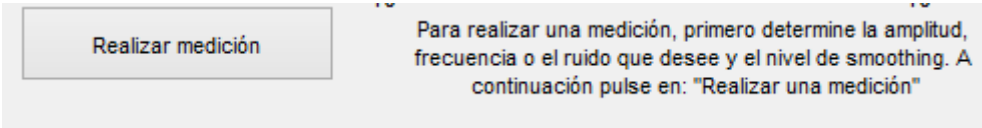


Figura 82. Este botón inicia el proceso de grabación, cálculo y presentación de los datos obtenidos

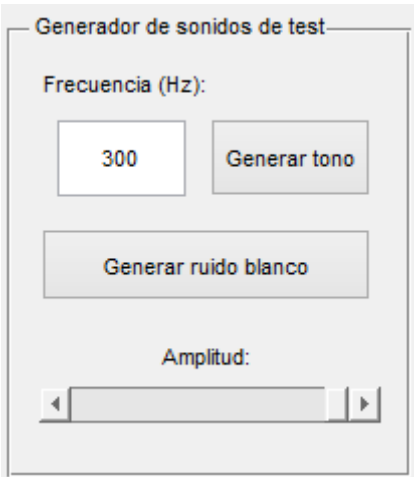


Figura 83. Generador de sonidos de test. Encargado de producir sonidos para realizar una medición. Se puede modificar tanto la frecuencia como la amplitud. Genera un tono o ruido blanco de 5 segundos de duración. Antes de realizar una medición este generador tiene que estar activo.

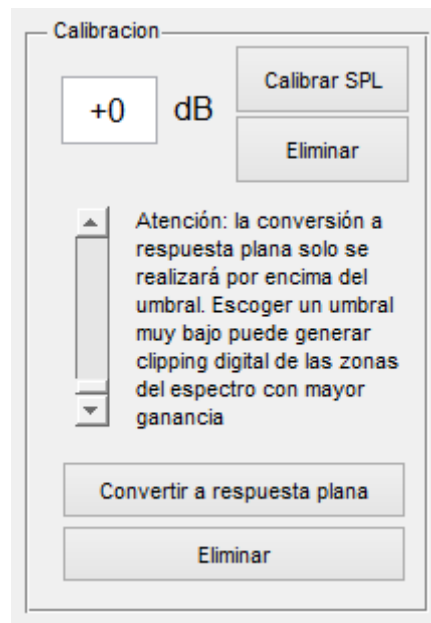


Figura 84. Calibración tanto de volumen como de respuesta en frecuencia. La calibración de volumen situará los valores del Eje Y en su posición correcta de acuerdo con el valor del sonómetro. Se puede tanto calibrar como eliminar la calibración y acepta valores negativos y positivos. La conversión a respuesta plana en cambio genera un filtro inverso que elimina las no linealidades frecuenciales del sistema. El umbral por encima del cual se realiza la conversión se sitúa en posición mediante el Slider y se verá reflejado en el gráfico como una línea horizontal. Esta calibración también se puede suprimir mediante el botón eliminar.

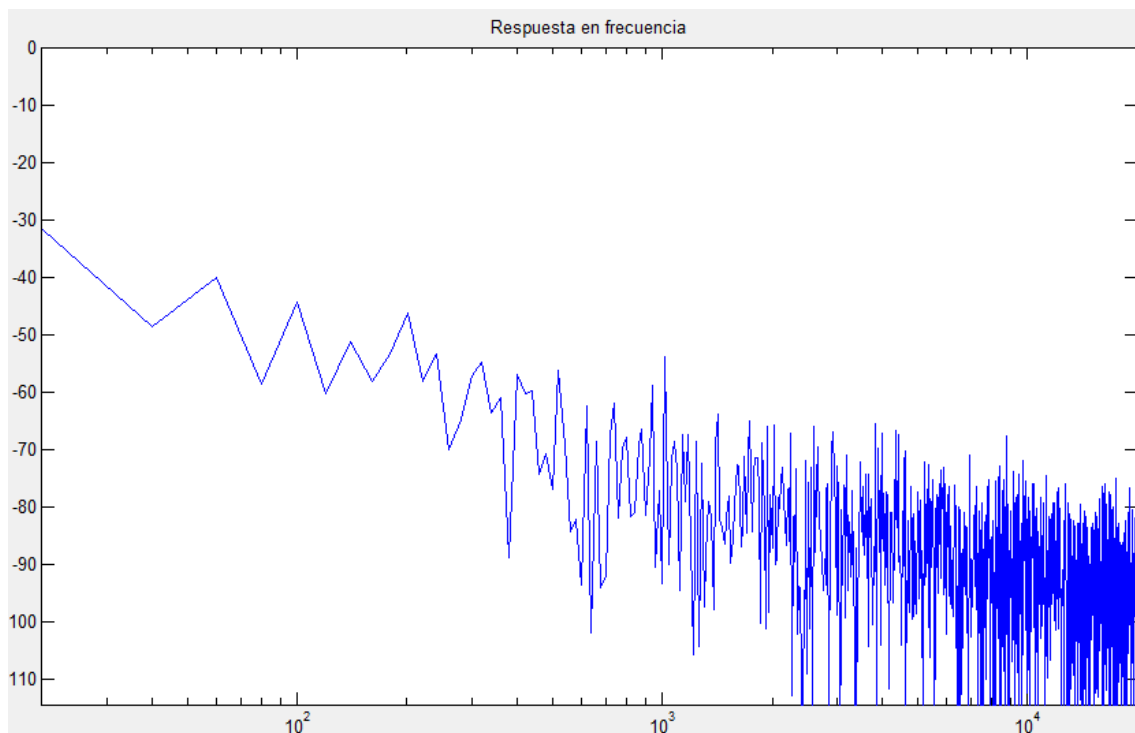


Figura 85. Respuesta en frecuencia previa calibración. Ejemplo realizado con el ruido de la tarjeta de sonido sin nada conectado. Se puede observar el gran valor del ruido flicker que condiciona todo el espectro.

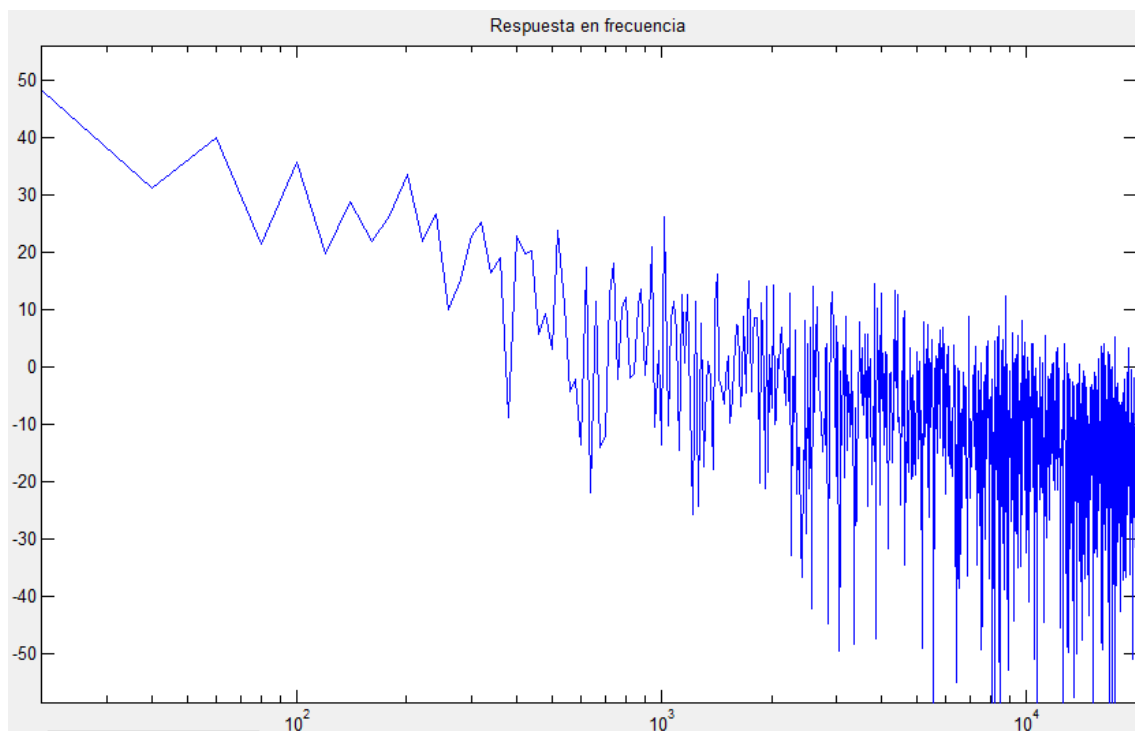


Figura 86. Calibración en volumen +80dB

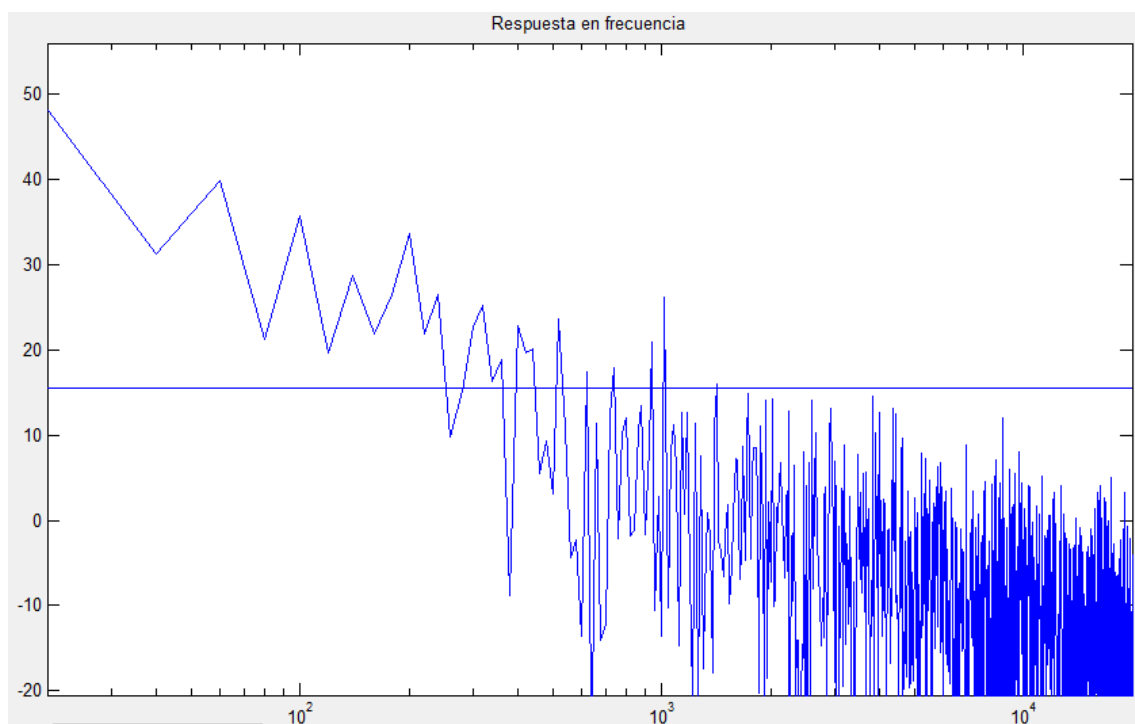


Figura 87. Umbral de conversión a respuesta plana situado en 16dB

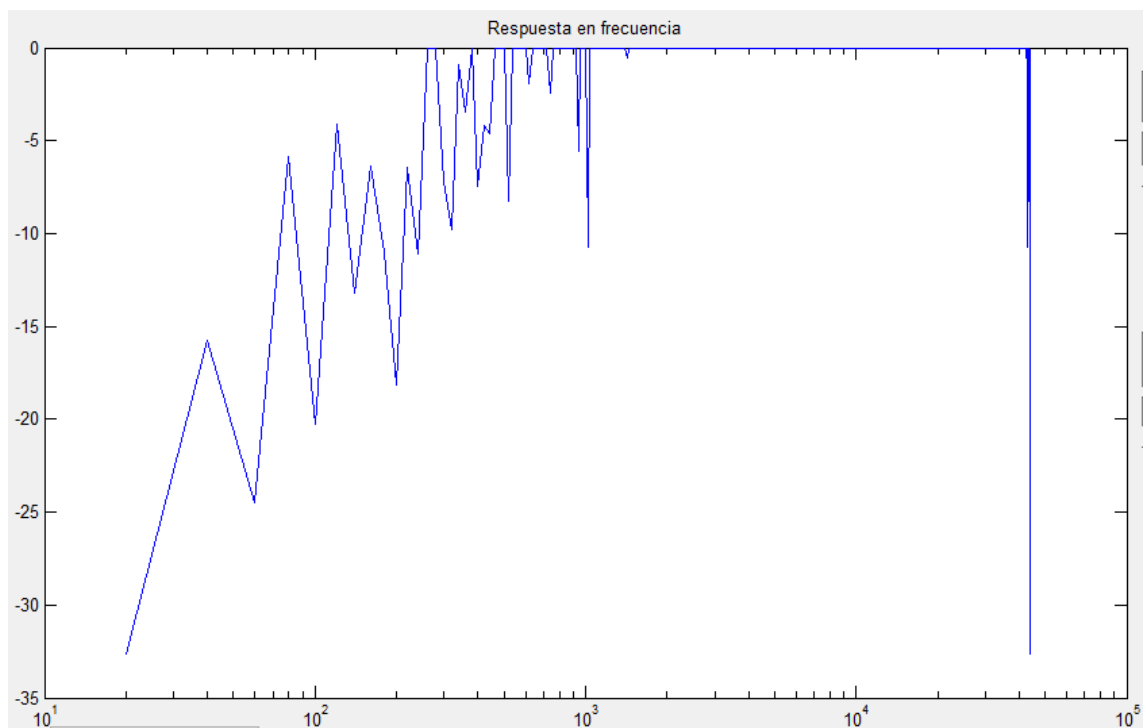


Figura 88. Filtro inverso generado

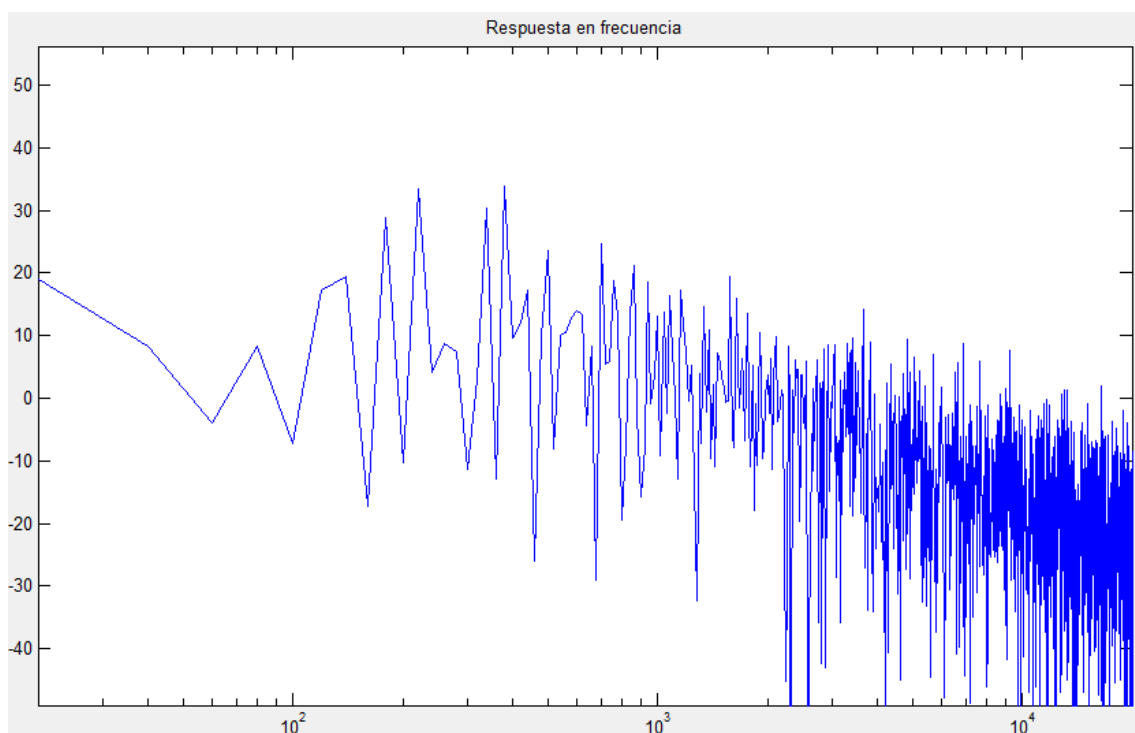


Figura 89. Nueva medición tras conversión a respuesta plana.

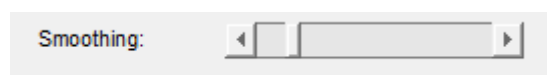


Figura 90. Elemento encargado de controlar el nivel de suavizado de los valores del gráfico

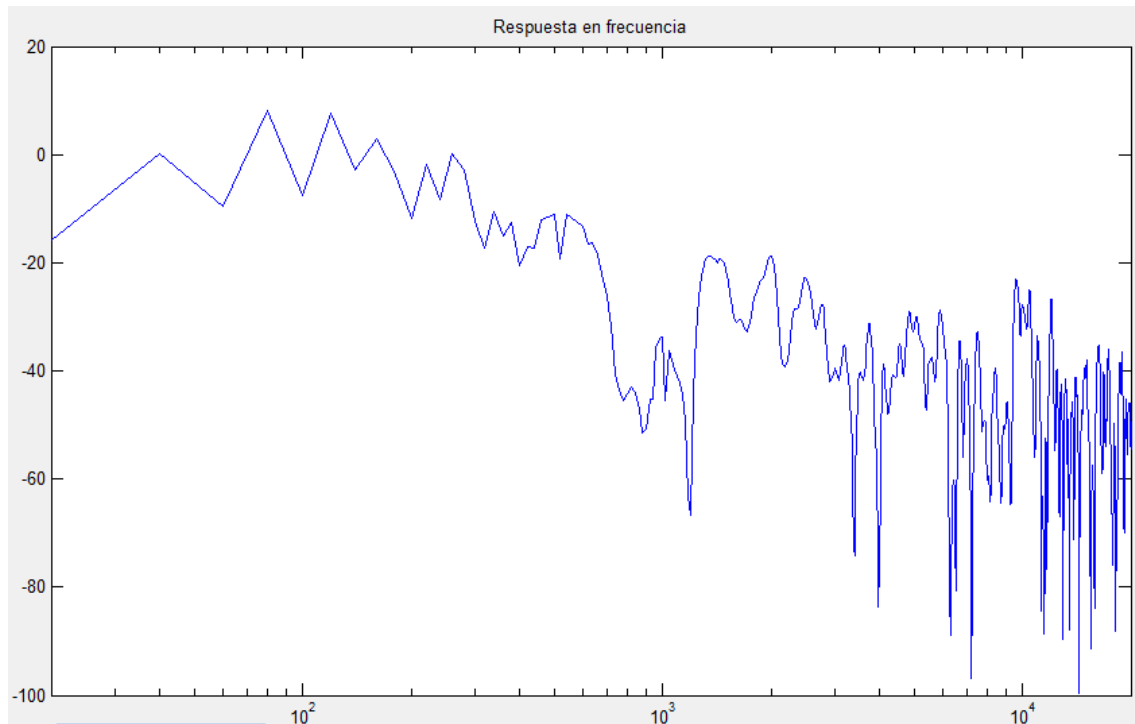


Figura 91. Respuesta en frecuencia tras aplicar un suavizado

El código debidamente comentado que realiza todo el procesado y muestra por pantalla los resultados es el siguiente:

```
function varargout = gui(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @gui_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @gui_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function gui_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

global decibelios filtrosm           %Definición de las variables
gloables
decibelios = 0                       %Variable utilizada para la
calibración del sistema
filtrosm = zeros(2205,1)             %Variable vector que contiene la
respuesta en frecuencia inversa al sistema
convertir                               %suavizada y se utiliza para
                                         %el sistema en respuesta plana

function varargout = gui_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Generación de tono para medición
cf = str2double(get(handles.edit1, 'string')); %
carrier frequency (Hz)
sf = 44100; % sample frequency (Hz)
d = 5.0; % duration (s)
n = sf * d; % number of samples
s = (1:n) / sf; % sound data preparation
```

```

amplitud =10^(get(handles.slider1, 'value')/20); %Extracción del valor
de la amplitud de la señal a generar del slider 1
                                % y covnersión a
                                % decibelios
s = amplitud*sin(2 * pi * cf * s); % sinusoidal modulation
sound(s, sf); % sound presentation

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
amplitud = get(handles.slider1, 'value');

    y1 = wgn(220500,1,amplitud); %y1 contiene un ruido blanco de
longitud 220500 y de amplitud determinada
    sound(y1,44100); %reproduccion de y1 a traves de la
tarjeta de sonido

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Y f Ysm; %Y es variable global y contiene la FFT de
la grabación realizada
                %f contiene el vector espacio de
frecuencia en
                %el que se trabaja

recObj = audiorecorder(44100,24,1); %Grabación de un sonido
44100 sample frequency, 24 bits
disp('Comienzo de grabacion.')
recordblocking(recObj, 0.05); %bloquea el regreso de los
datos de grabación 0.05 segundos
disp('Fin de grabacion.');
```

```

myRecording = getaudiodata(recObj); %la variable myrecording
contiene un vector de 44100 valores de la grabacion

Y = fft(myRecording); %fft de la grabación

f = linspace(0,44100,2205); %se genera el espacio de trabajo
en frecuencia

Ysm = smooth(Y,get(handles.slider9,'value'),'lowess') %suaviza la
respuesta en frecuencia funcion del slider9
dibujarespectro;

set(handles.axes1, 'XLim', [20 20000]); %limites del eje x

function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

global decibelios

decibelios = str2double(get(handles.edit2,'string')) % se
extrae el valor de la calibración en volumen del edit2

```



```
dibujarespectro();
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);
```

```
function dibujarespectro ()                                %función que dibuja la
respuesta en frecuencia
global decibelios f Ysm filtro sm

semilogx(f,20*log(abs(Ysm(1:2205)))+decibelios+filtro sm)    %grafica
la respuesta

title('Respuesta en frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('dB');
```

```
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
global decibelios umbral Y f filtro filtro sm;

for x=1:2205,                                              %Este for
se utiliza para generar el filtro inverso y conseguir la respuesta
plana
    if (20*log(abs(Y(x)))+decibelios)<=umbral              %para ello
se barre todo el vector Y, se genera un vector de respuesta inversa de
tal
        filtro(x)=0;                                      %modo que
ese valor inverso multiplicado por el valor de la respuesta en
frecuencia en
    else                                                  % un punto
de como resultado el valor umbral. Los valores por debajo del umbral
quedan inalterados

        filtro(x)=umbral-(20*log(abs(Y(x)))+decibelios)
    end
end

semilogx(f,filtro(1:2205))

filtro sm = smooth(filtro,get(handles.slider9,'value'),'lowess')

title('Respuesta en frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('dB');
```

```
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global umbral;

dibujarespectro
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);
set(handles.axes1, 'YLim',[(get(handles.slider3, 'Value')-
get(handles.slider4, 'Value')) get(handles.slider3, 'Value')]);

umbral=(get(handles.slider3, 'Value')-get(handles.slider4,
'Value')+(get(handles.slider4, 'Value')*get(handles.slider2,
```

```

'Value'))          %Obtiene el valor del umbral sobre el que debe actuar
la calibración
line([20 20000],[umbral umbral])          %Dibuja una línea
en el grafico que determina el umbral de calibración

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
dibujarespectro
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
%eliminar el valor de todas las variables que guardan la correccion de
la respuesta en frecuencia
global filtrosm filtro
filtrosm = 0*filtrosm
filtro = 0*filtro
dibujarespectro();
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);

function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles)
%desplazamiento por el grafico
set(handles.axes1, 'YLim',[(get(handles.slider3, 'Value')-
get(handles.slider4, 'Value')) get(handles.slider3, 'Value')]);

function slider4_Callback(hObject, eventdata, handles)
%zoom en el grafico
set(handles.axes1, 'YLim',[(get(handles.slider3, 'Value')-
get(handles.slider4, 'Value')) get(handles.slider3, 'Value')]);

function slider9_Callback(hObject, eventdata, handles)
%suavizado de la respuesta en frecuencia inversa controlado por el
slider9
global Ysm Y
Ysm = smooth(Y,get(handles.slider9,'value'),'lowess')
dibujarespectro
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);

function pushbutton22_Callback(hObject, eventdata, handles)
%elimina la calibración en volumen
global decibelios filtro
decibelios = 0
dibujarespectro();
set(handles.axes1, 'XLim',[20 20000]);

```

7. Presupuesto y tiempo de amortización

En este capítulo se ponen de manifiesto los costes acometidos en la realización del proyecto.

Recursos materiales:		300€
-	Micrófono ECM8000	50€
-	Sonómetro	70€
-	Tarjeta de sonido	100€
-	Altavoz W2-800SL	30€
-	Cables y conexiones	10€
-	Componentes electrónicos y eléctricos	30€
-	PVC, materiales acústicos y adhesivos	10€
Recursos humanos:		3550€
-	Torneado y mecanizado	200€
-	Desarrollo teórico	1850€
-	Diseño y montaje del PCB	450€
-	Desarrollo del software en Matlab	1050€
TOTAL:		3850€

El tiempo de amortización de la inversión de este proyecto, suponiendo un valor medio de mercado equivalente al ofertado en el siguiente enlace (55€):

<http://www.ucl.ac.uk/psychlangsci/research-facilities/anechoic-chamber>

Suponiendo también unos costes de transporte, tiempo de trayecto y preparación de la medición nulos, sitúan el tiempo de amortización de la inversión en **70 horas**.

8. Conclusiones

Teniendo en cuenta los costes acometidos, tiempo de amortización y el uso que le va a dar a la cámara se puede asegurar que este proyecto es un ahorro. Los resultados conseguidos en lo que a respuesta plana se refieren convierten a la filtración analógico-digital en un buen recurso. Por otro lado el sistema cumple los requisitos sobradamente, lo que convierte la idea de cámara anecoica de dimensiones pequeñas en comparación con la longitud de onda en una posibilidad de bajo coste muy recomendada.

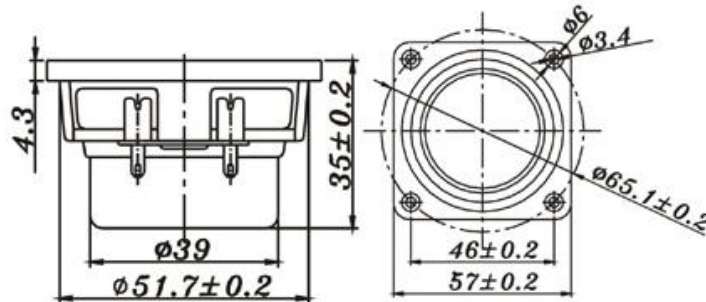
9. Bibliografía

- Leo L. Beranek "Acoustics" 1954 Edition, revised in 1993
- Basilio Pueo Ortega y Muga Romá Romero "Electroacústica: altavoces y micrófonos"
- Richard H. Small "Closed-Box Loudspeaker Systems" Partes I y II Journal of the Audio Engineering Society 1972
- Daniel R. Raichel "The science and applications of acoustics" 2006 Springer
- Harry F. Olson "Elements of Acoustical Engineering" 1940 edition D. Van Nostrand Company
- G.Porges "Applied Acoustics" 1977 edition Eduard Arnold Publishers

10. Anexos

F SERIES

W2-800SL



- FULL RANGE, WIDE DISPERSION DESIGN
- ABS BASKET
- INVERTED ALUM./MG WITH TPR SURROUND
- NEODYMIUM MAGNET DESIGN
- GOOD FOR MULTI-MEDIA, HOME THEATER, CAR APPLICATION
- MAGNETICALLY SHIELDED

2" ALUM./MG ALLOY FULL RANGE



DIAPHRAGM MTL	Alum/Mg Alloy
SURROUND MTL	TPR
NOMINAL IMPEDANCE	4 Ω
DCR IMPEDANCE	3.5 Ω
SENSITIVITY 1W/1m	87 dB
FREQUENCY RESPONSE	160-20K Hz
FREE AIR RESONANCE	160 Hz
VOICE COIL DIAMETER	25.4 mm
AIR GAP HEIGHT	3 mm
RATED POWER INPUT	10 W
MAXIMUM POWER INPUT	20 W
FORCE FACTOR, BL	3.55 TM
MAGNET WEIGHT (oz)	Neodymium
MOVING MASS	1 g
FERRO FLUID ENHANCED	No
SUSPENSION COMPL.	919.05 uMN ⁻¹
EFFEC.PISTON AREA	0.0013 M ²
Levc	0.038 mH
Zo	24 ohm
X-max	1 mm
Vas	0.22 Litr.
Qts	0.25
Qms	1.7
Qes	0.29



VOICE:886.2.26570282 FAX:886.2.26580166
E-MAIL :info@tb-speaker.com

Technical Specifications

Version 1.2 July 2000

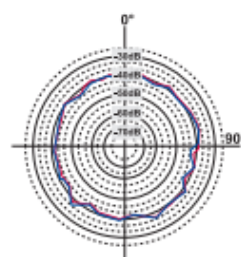
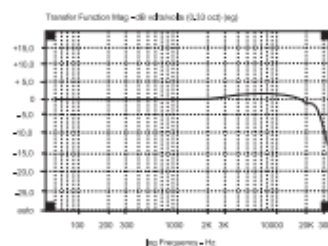
MEASUREMENT MICROPHONE

FEATURES

- ▲ Precise electret condenser measurement microphone
- ▲ Ultra-linear frequency response
- ▲ Well-balanced, true omni-directional pattern
- ▲ Optimally suited for room correction applications
- ▲ Phantom powered, +15 V to +48 V
- ▲ Rugged construction and sleek, modern design
- ▲ Microphone stand adapter and windscreen for outdoor measurement included
- ▲ Perfect for use with the ULTRA-CURVE DSP8000 / ULTRA-CURVE PRO DSP8024 or any other real-time analyzer
- ▲ Manufactured under the BEHRINGER quality control

SPECIFICATIONS

Type	electret condenser, omni-directional
Impedance	600 Ohms
Sensitivity	-60 dB
Frequency response	15 Hz to 20 kHz
Connector	gold-plated XLR
Phantom power	+15 V to +48 V
Weight	app. 120 g



BEHRINGER is constantly striving to maintain the highest professional standards. As a result of these efforts, modifications may be made from time to time to existing products without prior notice. Specifications and appearance may differ from those listed or illustrated.

The information contained in this sheet is subject to change without notice. No part of this sheet may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording of any kind, for any purpose, without the express written permission of BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH.

BEHRINGER and ULTRA-CURVE are registered trademarks. ALL RIGHTS RESERVED.

© 2000 BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH.

BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH, Hanns-Martin-Schleyer-Str. 36-38, 47877 Willich-Mönchheide II, Germany
Tel. +49 (0) 21 54 / 92 06-0, Fax +49 (0) 21 54 / 92 06-30

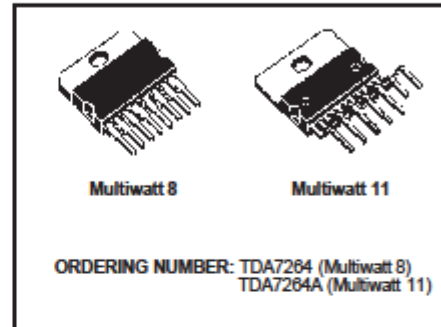




TDA7264 TDA7264A

25 + 25W STEREO AMPLIFIER WITH MUTE/ST-BY

- WIDE SUPPLY VOLTAGE RANGE (UP TO 50V ABS MAX.)
- SPLIT SUPPLY
- HIGH OUTPUT POWER:
25 + 25W @ THD=10%, $R_L = 8\Omega$, $V_S = \pm 20V$
- NO POP AT TURN-ON/OFF
- MUTE (POP FREE)
- STAND-BY FEATURE (LOW I_{Q1})
- FEW EXTERNAL COMPONENTS
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION

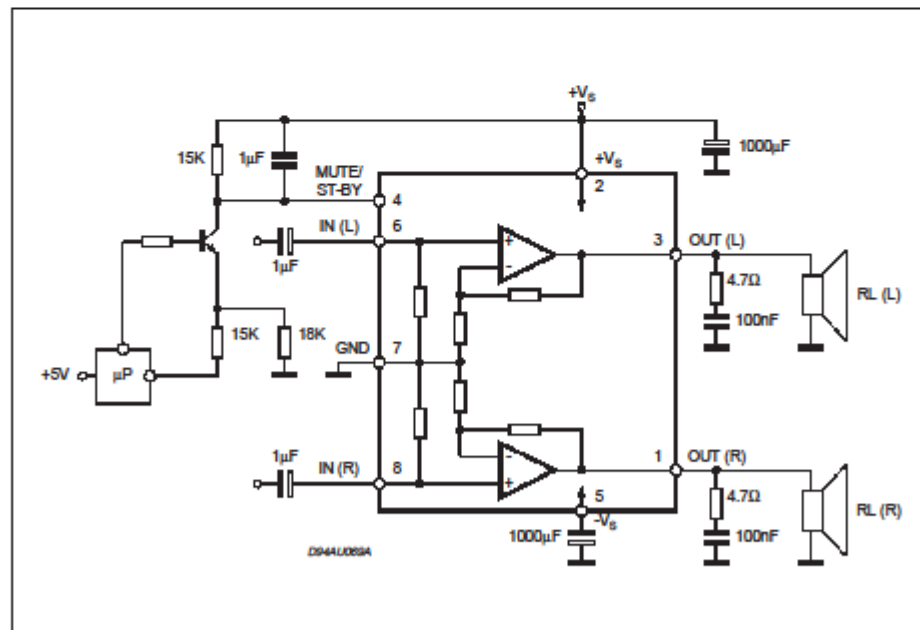


DESCRIPTION

The TDA7264/TDA7264A is class AB dual Audio power amplifier assembled in the Multiwatt package, specially designed for high quality sound ap-

plication as Hi-Fi music centers and stereo TV sets.

Figure 1: Typical Application Circuit for TDA7264



April 1999

1/12

Scarlett **2i2**

User Guide

SPECIFICATIONS

Performance Specifications

A-D dynamic range	105 dB 'A-weighted' (all inputs). Converter chipset A-D dynamic range 114 dB
D-A dynamic range	Range 104 dB 'A-weighted' (all outputs). Converter chipset D-A dynamic range 114 dB
Supported sample rates	44.1 kHz, 48 kHz, 88.2 kHz and 96 kHz
Microphone Inputs 1 & 2	
Frequency response	20 Hz - 20 kHz +/-0.1 dB
Gain range	+ 10 dB to + 55 dB
THD+N	0.002% (minimum gain, -1 dBFS input with 20 Hz - 22 kHz filter)
Noise EIN	120 dB: measured at 55 dB of gain with 150 Ohm termination (20 Hz - 22 kHz filter)
Input impedance	2 kOhm
Line Inputs 1 & 2	
Frequency response	20 Hz - 20 kHz +/-0.1 dB
Gain range	-10 dB to +35 dB
THD+N	0.002% (measured with -1 dBFS input and 22 Hz - 22 kHz filter)
Noise	-90 dBu (22 Hz - 22 kHz filter)
Input impedance	10 kOhm
Instrument Inputs 1 & 2	
Frequency response	20 Hz - 20 kHz +/-0.1 dB
Gain range	+10 dB to +55 dB
THD+N	0.005% (measured with -8 dBu input and 20 Hz - 22 kHz filter)
Noise	-87 dBu (20 Hz -22 kHz filter)
Line Outputs 1 & 2	
Maximum output level (0 dBFS)	10 dBu, balanced
THD+N	0.001% (measured with 0 dBFS input and 22 Hz - 22 kHz filter, unweighted)

OPERATION MANUAL

Digital Sound Level Meter



SPECIFICATIONS	
Applicable Standards	IEC 651 Type 2, ANSI S1.4 Type 2
Measurement Frequency Range Accuracy	31.5Hz~8KHz $\pm 1.5\text{dB}$ (Under reference conditions)
Measurement Level A Weighting	30dB~130dB
Measurement Level C Weighting	35dB~130dB
Measurement Level Range	6 ranges in 10dB steps: 30~80dB, 40~90dB, 50~100dB, 60~110dB, 70~120dB, 80~130dB
Automatic Range	30~130dB
Time Weighting	Fast and slow
Segment Range	50dB
Digital Display	3 1/2 digit LCD, 0.1dB resolution updated every 0.5 seconds
Quasi-Analog BarIndicator	1dB display steps, 50dB display range, updated every 50ms
Microphone	6mm diameter Electret condenser microphone
Analog Output	AC: 0.707Vrms (at full scale), DC: 10mVDC/dB
Size	80mm x 256mm x 38mm (3" x 11" x 1.5")
Weight	240g(10.3oz)
Operating Temperature	4~50°C, 10~90% Relative Humidity
Storage Temperature	-20~60°C
Battery	9V Battery